





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Maschinenspezifische Erhöhung der  
Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung**

**Christian Eschey, M.Sc.**

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. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 13.11.2012 an der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.02.2013 angenommen.



Christian Eschey

**Maschinenspezifische Erhöhung  
der Prozessfähigkeit  
in der additiven Fertigung**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 274

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2013

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2013

ISBN 978-3-8316-4270-0

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://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 vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Weiterhin gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München mein Dank für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie bei allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Im Besonderen danke ich allen Kolleginnen und Kollegen im Forschungsfeld „Additive Fertigung“, die durch ihre Anmerkungen und konstruktiven Diskussionen wesentlich zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein aufrichtiger Dank gilt meiner Frau Christine, der ich diese Arbeit widme. Nur durch ihre vielfältige Unterstützung wurde die Erstellung dieser Arbeit erst ermöglicht.

Augsburg, im März 2013

*Christian Eschey*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme</b> .....	<b>vii</b>
<b>Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen</b> .....	<b>xi</b>
<b>Verzeichnis der griechischen Formelzeichen</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise .....	4
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Vorgehen im Kapitel.....	7
2.2 Additive Fertigung.....	7
2.2.1 Definition und Verfahrenssystematik .....	7
2.2.2 Systemtechnische Analyse eines additiven Fertigungssystems.....	8
2.2.3 Prozessablauf in der additiven Fertigung.....	11
2.3 Methoden zur Fähigkeitsuntersuchung.....	15
2.3.1 Allgemeines.....	15
2.3.2 Toleranzen.....	16
2.3.3 Prüfmittelfähigkeit .....	17
2.3.4 Prozessfähigkeit .....	19
2.3.5 Kennzahlen.....	22
2.4 Zusammenfassung.....	24

<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>27</b>
3.1	Vorgehen im Kapitel.....	27
3.2	Gestaltabweichungen additiv gefertigter Werkstücke .....	27
3.2.1	Allgemeines .....	27
3.2.2	Schrumpf (engl.: thermal shrinkage) .....	29
3.2.3	Schwindung (engl.: shrinkage) .....	30
3.2.4	Verzug (engl.: warpage) .....	33
3.2.5	Schichtüberhärtung (engl.: overcure) .....	34
3.2.6	Rauheit (engl.: surface roughness).....	35
3.3	Einflussfaktoren auf die Prozessfähigkeit additiver Fertigungsverfahren .....	36
3.3.1	Allgemeines .....	36
3.3.2	Einflussfaktor <i>Mensch</i> .....	37
3.3.3	Einflussfaktor <i>Methode</i> .....	38
3.3.4	Einflussfaktor <i>Maschine</i> .....	38
3.3.5	Einflussfaktor <i>Material</i> .....	39
3.3.6	Einflussfaktor <i>Milieu</i> .....	39
3.4	Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung .....	40
3.4.1	Allgemeines .....	40
3.4.2	Empirische Prozessentwicklung .....	40
3.4.3	Numerische Simulation.....	42
3.4.4	Geometriebasierte Optimierung.....	43
3.4.5	Fertigungsgerechtes Gestaltungsprinzip .....	45
3.4.6	Standardisierung und Normierung.....	46
3.4.7	Zweckmäßige Lerntätigkeiten .....	47

3.4.8 Technologische Weiterentwicklungen .....	48
3.4.9 Hybride Ansätze .....	49
3.5 Zusammenfassung .....	49
<b>4 Identifikation des Handlungsbedarfs .....</b>	<b>51</b>
4.1 Allgemeines .....	51
4.2 Abgeleiteter Handlungsbedarf .....	52
4.3 Anforderungen an eine Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit .....	52
<b>5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung .....</b>	<b>55</b>
5.1 Vorgehen im Kapitel .....	55
5.2 Definition des Begriffs <i>Maschinencharakteristik</i> .....	56
5.3 Erfassung der Maschinencharakteristik .....	57
5.3.1 Allgemeines .....	57
5.3.2 Beobachtbarkeit von Merkmalen .....	59
5.3.3 Formalisierung beobachtbarer Merkmale .....	60
5.4 Bewertung der Maschinencharakteristik .....	64
5.4.1 Allgemeines .....	64
5.4.2 Darstellung der Maschinencharakteristik .....	65
5.4.3 Bewertung der Auswirkungen .....	66
5.5 Rückführung der Maschinencharakteristik .....	67
5.5.1 Allgemeines .....	67
5.5.2 Steuerbarkeit von Merkmalen .....	68
5.5.3 Direkte Rückführung in die Konstruktion .....	69
5.5.4 Direkte Rückführung in die Vorbereitung .....	71

5.5.5 Direkte Rückführung in den Aufbauprozess .....	74
5.5.6 Indirekte Rückführung in bestehende Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit .....	74
5.5.7 Auswahl der geeigneten Rückführung.....	75
5.6 Zusammenfassung .....	76
<b>6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns .....</b>	<b>79</b>
6.1 Vorgehen im Kapitel.....	79
6.2 Vorstellung des untersuchten Systems .....	79
6.3 Voruntersuchungen zum Wärmehaushalt.....	82
6.4 Erfassung und Bewertung der Maschinencharakteristik .....	88
6.4.1 Allgemeines .....	88
6.4.2 Nachweis der Prüfmittelfähigkeit .....	88
6.4.3 Schwindung in x-Richtung .....	91
6.4.4 Schwindung in y-Richtung .....	94
6.4.5 Schwindung in z-Richtung.....	97
6.5 Diskussion der Prozessfähigkeit.....	105
6.5.1 Vorgehen.....	105
6.5.2 Schwindung in x-Richtung .....	106
6.5.3 Schwindung in y-Richtung .....	108
6.5.4 Schwindung in z-Richtung.....	109
6.5.5 Ableitung des weiteren Vorgehens.....	110
6.6 Erhöhung der Prozessfähigkeit durch Rückführung der Maschinencharakteristik .....	111
6.6.1 Vorgehen.....	111
6.6.2 Vordeformation der Probekörper.....	112

6.6.3 Ergebnis.....	115
6.7 Zusammenfassung.....	118
<b>7 Technische und wirtschaftliche Bewertung.....</b>	<b>121</b>
7.1 Vorgehen im Kapitel.....	121
7.2 Technische Bewertung.....	121
7.2.1 Betrachtete Branchen und Annahmen.....	121
7.2.2 Anwendung in der Konsumgüterindustrie.....	122
7.2.3 Anwendung in der Medizin- und Dentalbranche.....	123
7.2.4 Anwendung in der Automobilbranche.....	123
7.2.5 Anwendung in der Luft- und Raumfahrt.....	124
7.3 Wirtschaftliche Bewertung.....	124
7.3.1 Allgemeines.....	124
7.3.2 Amortisation durch höhere Verkaufserlöse.....	125
7.3.3 Amortisation durch Reduzierung von Ausschuss.....	130
7.4 Zusammenfassung.....	134
<b>8 Schlussbetrachtung.....</b>	<b>137</b>
8.1 Zusammenfassung der Arbeit.....	137
8.2 Ausblick.....	139
<b>9 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>141</b>
<b>10 Anhang.....</b>	<b>159</b>
10.1 Probekörper zur Erfassung der Schwindung.....	159
10.2 Prüfmittelfähigkeit für Höhenmessgerät Hi_Cal 300.....	161
10.3 Messdaten und Auswertungen zur Schwindung in x-Richtung.....	163

## **Inhaltsverzeichnis**

---

10.4 Messdaten und Auswertungen zur Schwindung in y-Richtung .....	166
10.5 Messdaten und Auswertungen zur Schwindung in z-Richtung.....	168
10.6 Verwendeter Parametersatz .....	177
10.7 Verwendete Programme .....	178
10.8 Maschinenstundensatzrechnung .....	179



## Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
3D	dreidimensional
a	lat.: annus für Jahr
al.	lat.: alii für andere
AMF	engl.: Additive Manufacturing File für dt.: Datei für die additive Fertigung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bzw.	beziehungsweise
C#	Name einer Programmiersprache
ca.	circa
CAD	engl.: Computer Aided Design für dt.: Computer-unterstütztes Design
C <sub>M</sub>	Maschinencharakteristik
CP	engl.: Control point für dt.: Kontrollpunkt
CP <sub>n</sub>	Kontrollpunkt n
d. h.	das heißt
dt.	deutsch
DGQ	Deutsche Gesellschaft für Qualität e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	engl.: Design of Experiments für dt.: Versuchsplanung

## Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

---

e. V.	eingetragener Verein
engl.	englisch
et	und
evtl.	eventuell
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFD	engl.: Free Form Deformation für dt.: Freiformdeformation
FuE	Forschung und Entwicklung
GB	Gigabyte
ggf.	gegebenenfalls
GHz	Gigahertz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Geometrische Produktspezifikation
h	lat.: hora für Stunde
iLAS	Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik
ISO	engl.: International Organization for Standardization für dt.: Internationale Organisation für Normung
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München
IWH	Institut für Wirtschaftsforschung Halle
K	Kelvin
kB	Kilobyte
kW	Kilowatt
LZN	Laser Zentrum Nord
lat.	lateinisch
m	Meter
M	Maschine

## Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

MF	Messfläche
mm	Millimeter
PA	Polyamid
PC	Personal Computer
PWM	Pulsweitenmodulation
RM	engl.: Rapid Manufacturing für dt.: schnelle Fertigung
s	Sekunde
sog.	sogenannt(es)
STL	engl.: Standard Triangulation Language Format für dt.: Dateiformat zur Beschreibung der Oberfläche eines Körpers durch Dreiecke
TM	engl.: Trademark für dt.: Markenzeichen
TUHH	Technische Universität Hamburg-Harburg
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
UV	ultraviolett
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
ZW	Zielwert



## Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Fläche
$A_{min,1}$	$m$	minimale Abweichung, welche nach Verfahren 1 gemäß Prüfmittelfähigkeit erfasst werden kann
$A_{min,2}$	$m$	minimale Abweichung, welche nach Verfahren 2 gemäß Prüfmittelfähigkeit erfasst werden kann
$B_F$	$\text{€}/(m^2 \cdot a)$	Betriebskosten pro Fläche
$C_f$	%	Curlfaktor
$C_p$	-	Prozessfähigkeitsindex
$C_{pk}$	-	Kritischer Prozessfähigkeitsindex
$d_{BO}$	$m$	Strahlkompensationsfaktor
$D_P$	$kg/m^3$	Dichte des Materials (pulverförmig)
$D_S$	$kg/m^3$	Dichte des Materials (gesintert)
$E_3$	-	Einheitsmatrix mit Rang 3
$f(\dots)$	-	mathematische Funktion
$f_{oben}(\dots)$	%	mathematische Funktion zur Beschreibung der positiven Abweichung der Schwindung von der linearen Schwindungskompensation, welche gerade noch prozesssicher erfasst werden kann
$f_{unten}(\dots)$	%	mathematische Funktion zur Beschreibung der negativen Abweichung der Schwindung von der linearen Schwindungskompensation, welche gerade noch prozesssicher erfasst werden kann

## Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen

---

$F_A$	$m^2$	Flächenbedarf
$I_{KS}$	%	Instandhaltungskostensatz
$K_A$	€/h	Abschreibungskosten
$K_D$	€/m <sup>3</sup>	Druckluftpreis
$K_{DL}$	€/h	Druckluftkosten
$K_E$	€/h	Energiekosten
$K_E$	€	Einmalkosten
$K_F$	€	Kosten für Formalisierung
$K_I$	€/h	Instandhaltungskosten
$K_M$	€	Maschinenkosten
$K_{MAT}$	€	Materialkosten
$K_{MAT,P}$	€	Materialkosten durch verlorenes Pulver
$K_{MAT,PK}$	€	Materialkosten der Probekörper
$K_{MH}$	€/h	Maschinenstundensatz
$K_{PH}$	€/h	Personalkostensatz
$K_R$	€/h	Raumkostensatz
$K_{SP}$	€/(kW·h)	Strompreis
$K_V$	€	variable Kosten
$K_{V,WS}$	€	variable Kosten pro Werkstück
$K_{VM}$	€	Kosten für Vermessung
$K_{VM,PK}$	€	Kosten für taktile Vermessung pro Probekörper
$K_Z$	€/h	Zinskosten
$l$	$m$	Länge ( $\Delta l$ für Änderung dieser Größe)
$l_A$	$m$	Außenlänge

## Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen

$l_{AI}$	$m$	Mittelwert zwischen Außen- und Innenlänge zur Kompensation des Fehlers in der Strahlkompensation
$l_I$	$m$	Innenlänge
$l_{Komp}$	$m$	kompensierte Länge
$l_{Krit}$	$m$	kritische Länge
$l_{Res}$	$m$	resultierende Länge
$l_{Soll}, l_{Ist}$	$m$	Sollmaß, Istmaß einer Länge
$m$	$kg$	Masse
$m_{PK}$	$kg$	Masse eines Probekörpers
$n$	-	Zählvariable
$N_F$	%	Nutzungsfaktor
$OSG$	kontextabhängig	obere Toleranzgrenze
$P_L$	$W$	Laserstrahlleistung
$\mathbf{p}_{CPn}$	$m$	3D-Position eines Kontrollpunkts $CPn$
$P_{MAT}$	$€/kg$	Materialpreis
$P_N$	$kW$	Nennleistung
$q$	-	Stückzahl
$q_{PK}$	-	Anzahl an Probekörpern
$R$	kontextabhängig	Auflösung einer Messeinrichtung
$R_A$	%	Materialauffrischrate
$s$	%	Schwindung ( $\Delta s$ für Änderung dieser Größe)
$s_x, s_y, s_z$	%	Schwindung in x-, y- bzw. z-Richtung
$s_x(\mathbf{p}), s_y(\mathbf{p}), s_z(\mathbf{p})$	%	Schwindung in x-, y- bzw. z-Richtung an der Position $\mathbf{p}$
$T$	kontextabhängig	Toleranzfeld

## Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen

---

$t$	$s$	<i>Zeit</i>
$t_B$	$s$	<i>Dauer der Bauphase</i>
$t_{CD}$	$s$	<i>Dauer der Abkühlphase</i>
$t_{Doku}$	$s$	<i>Dauer für Dokumentation</i>
$t_F$	$s$	<i>Dauer für Formalisierung</i>
$t_{HU}$	$s$	<i>Dauer der Aufheizphase</i>
$t_{ND}$	$a$	<i>Nutzungsdauer</i>
$t_{NZ}$	$h$	<i>jährliche Nutzungszeit</i>
$t_{Vordef}$	$s$	<i>Dauer für Vordeformation</i>
$USG$	<i>kontextabhängig</i>	<i>untere Toleranzgrenze</i>
$V$	$m^3$	<i>Volumen</i>
$V_A$	$\%$	<i>Verfügbarkeit</i>
$V_{BJ}$	$m^3$	<i>Volumen eines Baujobs</i>
$V_D$	$m^3/h$	<i>Druckluftverbrauch</i>
$V_{MAT}$	$\%$	<i>Materialverlustfaktor</i>
$V_{PK}$	$m^3$	<i>Volumen eines Probekörpers</i>
$W_{WB}$	$\text{€}$	<i>Wiederbeschaffungswert</i>
$X, Y, Z$	$m$	<i>Position auf Koordinatenrichtungen</i>
$X_{CPn}, Y_{CPn}, Z_{CPn}$	$m$	<i>X-, Y- bzw. Z-Position des Kontrollpunkts CPn</i>
$x, y, z$	-	<i>kartesische Koordinatenrichtungen</i>
$X_M$	$m$	<i>Mittenposition der verfügbaren Baufäche in x-Richtung</i>
$Y_M$	$m$	<i>Mittenposition der verfügbaren Baufäche in y-Richtung</i>
$ZO$	$\%$	<i>Skalierungsfaktor für die Kompensation der</i>



## Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen

		<i>Schwindung in z-Richtung bei <math>Z = 0</math> mm</i>
$Z_{0,XY}$	%	<i>Skalierungsfaktor für die Kompensation der Schwindung in z-Richtung bei <math>Z = 0</math> mm an der Position (X, Y)</i>
$Z_{300}$	%	<i>Skalierungsfaktor für die Kompensation der Schwindung in z-Richtung bei <math>Z = 300</math> mm</i>
$Z_{300,XY}$	%	<i>Skalierungsfaktor für die Kompensation der Schwindung in z-Richtung bei <math>Z = 300</math> mm an der Position (X, Y)</i>
$Z_{MF}$	m	<i>z-Position einer Messfläche</i>
$Z_{min}$	m	<i>minimale z-Position eines Werkstücks</i>
$Z_{Ref}$	m	<i>Referenzposition in z-Richtung</i>
$Z_S$	%	<i>Zinssatz</i>



## Verzeichnis der griechischen Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	$K^{-1}$	Längenausdehnungskoeffizient
$\mu$	<i>kontextabhängig</i>	Merkmalsmittelwert
$\Delta(x)$	<i>kontextabhängig</i>	Änderung der Größe ( $x$ )
$\Delta\vartheta$	$K$	Temperaturdifferenz
$\sigma$	<i>kontextabhängig</i>	Prozessstreuung
$\hat{\sigma}$	<i>kontextabhängig</i>	Schätzwert für die Prozessstreuung



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Am Wirtschaftsstandort Deutschland waren im Jahr 2010 19 % aller Erwerbstätigen im produzierenden Gewerbe beschäftigt (STATISTISCHES BUNDESAMT 2011). Obwohl der primäre Wirtschaftssektor stark schrumpft, bleibt die industrielle Produktion der zentrale Treiber für die Wertschöpfung und Beschäftigung (ABELE & REINHART 2011). Mit dem Übergang von der Produktions- in die Dienstleistungsgesellschaft (STATISTISCHES BUNDESAMT 2011) verändern sich jedoch auch die vom Markt gestellten Anforderungen an das produzierende Gewerbe. Sogenannte Megatrends, wie die Flexibilisierung der Organisationsformen, erfordern eine deutliche Anpassung der Unternehmensstrukturen (ZÄH 2003). Um am Hochlohnstandort Deutschland weiterhin wirtschaftlich produzieren zu können, sind gezielte Strategien zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit erforderlich (BRANNER 2011). Als eine Möglichkeit dafür kann die flexible Gestaltung von Produktionsstrukturen angesehen werden (ABEL 2011; ABELE & REINHART 2011). Durch eine schnelle und wirtschaftliche Herstellung kundenindividueller Werkstücke können die Unternehmen neue Produkte zügig am Markt platzieren und somit den Kostenvorteil von Niedriglohnländern kompensieren. Zur Erfüllung der Kundenindividualität ist für die Unternehmen jedoch eine Fokussierung auf komplexe und spezialisierte Produkte notwendig (SCHUH ET AL. 2011).

Die additive Fertigung kann in diesem Kontext als eine Möglichkeit angesehen werden, die zukünftigen Anforderungen effizient bedienen zu können, da hiermit eine Lösung des Problems zwischen günstiger Massenfertigung und teurer Einzelteilfertigung möglich ist (SCHLEIFENBAUM ET AL. 2011). Seit dem Beginn der Entwicklung der additiven Fertigungsverfahren in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts (DECKARD 1986; HULL 1984; MEINERS ET AL. 2001) weist der Markt durchschnittlich jährliche Wachstumsraten von 26,4 % auf (WOHLERS 2010). Die additiven Fertigungsverfahren können dadurch charakterisiert werden, dass Werkstücke durch wiederholtes Hinzufügen eines Materials erzeugt werden. Der Aufbauprozess erfolgt dabei zumeist schichtweise. Ursprünglich für die Herstellung von Prototypen entwickelt, werden die Verfahren heute in unterschiedlichen Wirtschaftszweigen eingesetzt (AZARI & NIKZAD 2009; GEBHARDT 2007; LEVY 2009; SKRYNECKI 2010). Durch intensive Forschungs- und Entwicklungsleistungen konnte zudem die Bandbreite an verarbeitbaren Werkstoffen seit

## 1 Einleitung

---

der Technologieentstehung erweitert werden (COREMANS 1999; SEHRT 2010; ZHANG 2004).

Die besonderen Vorteile der additiven Fertigung liegen in der Flexibilisierung des Produktionsablaufs und der Formgebungsfreiheit (KLOCKE & PETERS 2003). Zudem sind die Fertigungskosten weitgehend unabhängig von der zu realisierenden Werkstückkomplexität (ZÄH 2006). Den steigenden Kosten für Energie und Rohstoffe kann durch eine Massereduktion bei den Werkstücken begegnet werden (LOUGHBOROUGH UNIVERSITY 2007). Zur Nutzung der sich aus der additiven Fertigung erschließenden Potenziale und Anwendungsgebiete ist jedoch ein tief greifender Paradigmenwechsel in der Produktionstechnik notwendig.

Die Potenziale, welche in der additiven Fertigung liegen, sind Motivation für diese Arbeit. Um diese in einem industriellen Kontext nutzen zu können, ist ein weitreichendes Wissen bezüglich der derzeit erreichbaren Qualität notwendig. Dieser in der Anwendung nicht näher spezifizierte Begriff soll durch eine Überführung in die Prozessfähigkeit konkretisiert werden. Ein Prozess wird demnach als *fähig* bezeichnet, wenn ein Werkstück mit der jeweils geforderten Qualität reproduzierbar hergestellt werden kann. Mit der vorliegenden Arbeit soll ein Beitrag zur weiteren Entwicklung der additiven Fertigung und deren Etablierung in der Produktion geleistet werden.

### 1.2 Zielsetzung

In Zeiten von erheblichem Wettbewerbsdruck und zunehmender Globalisierung der Märkte betrachten die meisten Unternehmen Qualität als einen Schlüsselfaktor für langfristigen Erfolg (RINNE & MITTAG 1999). In konventionellen Fertigungsverfahren wie der Zerspanung im Metallbereich und dem Spritzgießen im Kunststoffbereich verfügen Unternehmen über umfangreiches Erfahrungswissen bezüglich der erzielbaren Prozessfähigkeit und der damit verbundenen Kosten. Die additive Fertigung kann in diesem Kontext als eine Technologie bestehend aus innovativen Verfahren angesehen werden, für welche der genannte Wissensstand nur eingeschränkt nutzbar ist.

Der Begriff *Prozessfähigkeit* und die damit verbundenen Methoden werden in den Bereich der additiven Fertigung eingeführt. Dadurch soll ein objektiver Vergleich mit den konventionellen Verfahren ermöglicht werden. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht in der Quantifizierung und im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses in der Erhöhung der Prozessfähigkeit, jeweils fokussiert auf die additive Fertigung.

Die Arbeit erweitert bestehende Ansätze zur Erhöhung der Prozessfähigkeit so, dass das charakteristische Verhalten einer Maschine in der Prozesskette berücksichtigt werden kann. Unter dem charakteristischen Verhalten einer Maschine ist zu verstehen, dass aufgrund einer Vielzahl an Einflussfaktoren die erzielbare Prozessfähigkeit von dem verwendeten Fertigungssystem abhängt. Zwei baugleiche Maschinen sind demnach nicht in der Lage, gleiche Ergebnisse zu produzieren. Die Unterschiede sind jedoch nur dann als relevant zu bezeichnen, wenn diese für eine bestimmte Anwendung eine definierte Toleranzgrenze überschreiten.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer generischen Methode, durch welche der vorstehend beschriebene Sachverhalt in der additiven Fertigung berücksichtigt werden kann. Der Anwender der Methode soll durch ein Vorgehensmodell in die Lage versetzt werden, das charakteristische Verhalten eines Fertigungssystems zu erfassen, zu bewerten und geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit zu ergreifen.

## 1.3 Vorgehensweise

Zur Erreichung der beschriebenen Zielsetzung ist die Arbeit nach dem in Abbildung 1 dargestellten Schema strukturiert.

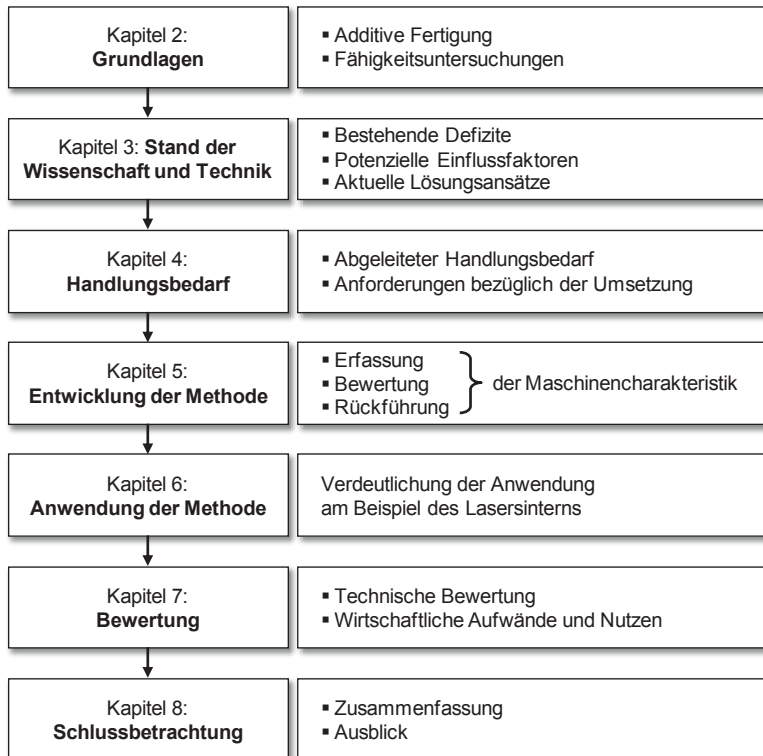


Abbildung 1: Struktur der vorliegenden Arbeit

Die Arbeit ist in acht Kapitel untergliedert, wobei im ersten die Motivation und die Zielsetzung erläutert wurden. Im Kapitel 2 werden die für das Verständnis der Arbeit relevanten Grundlagen in Bezug auf additive Fertigungsverfahren sowie Methoden zur Bestimmung der Prozessfähigkeit beschrieben.

Kapitel 3 dient dazu, den Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der additiven Fertigung wiederzugeben. Es werden hierbei die derzeit noch bestehenden Defizite in Form von Gestaltabweichungen dargelegt und potenzielle Ursachen aufgezeigt. Nachfolgend werden die für die Prozessfähigkeit relevanten



Einflussfaktoren aus den Bereichen *Mensch, Methode, Maschine, Material* und *Milieu* (sog. „5 M“ gemäß RINNE & MITTAG (1999)) diskutiert. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht über ausgewählte, aktuelle Strategien zur Erhöhung der Prozessfähigkeit.

Ausgehend vom Stand der Wissenschaft und Technik wird in Kapitel 4 der resultierende Handlungsbedarf nach einer maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit abgeleitet. Ferner erfolgt eine Aufstellung der Anforderungen, die mit einer methodischen Umsetzung verbunden sind.

In Kapitel 5 wird die entwickelte Methode erläutert. Einführend wird der Begriff *Maschinencharakteristik* definiert. Die Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit orientiert sich in ihrem Aufbau an einem Regler, welcher Daten aufnimmt, sie in geeigneter Form verarbeitet und in die zu optimierende Prozesskette zurückführt. Das Kapitel 5 ist folglich in die Abschnitte *Erfassung, Bewertung* und *Rückführung* untergliedert. Die Methode wird dabei allgemein für die additiven Verfahren formuliert.

Die konkrete Anwendung der Methode am Beispiel des Verfahrens *Lasersintern* ist Inhalt von Kapitel 6. Um die Nutzung zu verdeutlichen, folgt das Kapitel in weiten Teilen dem Aufbau der allgemein formulierten Methode durch die Erfassung, die Bewertung und die Rückführung der Maschinencharakteristik. Einführend werden das untersuchte System vorgestellt und die bestehenden Defizite beleuchtet. Die mit dem System zu erzielende Prozessfähigkeit wird sowohl vor Anwendung der Methode als auch nach Beachtung der Maschinencharakteristik in Form von Allgemeintoleranzen angegeben. Das Ziel der Anwendung ist die Erhöhung der Maßhaltigkeit und dieses soll erreicht werden, indem die Auswirkungen der Schwindung reduziert werden.

In Kapitel 7 erfolgt eine Bewertung sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht. Abschließend werden in Kapitel 8 die Inhalte der Arbeit zusammengefasst sowie weitere Entwicklungsmöglichkeiten des präsentierten Ansatzes vorgestellt.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Vorgehen im Kapitel

Zum besseren Verständnis der Arbeit werden in den nachfolgenden Abschnitten die Grundlagen der additiven Fertigung sowie der Methoden zur Bestimmung und Untersuchung der Prozessfähigkeit erläutert. Einführend werden Definitionen für die verschiedenen Arten additiver Fertigungsverfahren wiedergegeben. Mithilfe einer systemtechnischen Analyse werden die Funktionen und zentralen Komponenten einer Maschine zur additiven Fertigung erläutert. Danach werden die einzelnen Phasen des Prozessablaufs zur Herstellung eines Werkstücks mittels additiver Verfahren beschrieben sowie die Einsatzmöglichkeiten der Werkstücke im Produktlebenszyklus dargelegt. Der darauf folgende Abschnitt widmet sich den Methoden zur Bestimmung der Prozessfähigkeit. Toleranzen sind dabei als eine Möglichkeit anzusehen, um die vom Anwender spezifizierten Anforderungen zu konkretisieren. Durch den Nachweis der Prüfmittelfähigkeit kann sichergestellt werden, dass diese Anforderungen mit dem verwendeten Messsystem prozesssicher erfasst werden können. Anschließend werden die unterschiedlichen Arten von Prozessfähigkeit vorgestellt und gängige Kennzahlen zu ihrer Quantifizierung eingeführt.

### 2.2 Additive Fertigung

#### 2.2.1 Definition und Verfahrenssystematik

Die Bezeichnung *additive Fertigung* bildet einen Oberbegriff für eine Technologie, deren Verfahrensweise durch eine hinzufügende bzw. aneinanderreichende Tätigkeit geprägt ist. Unter diesem Oberbegriff werden alle Fertigungsverfahren zusammengefasst, welche durch sukzessives elementweises oder schichtweises Hinzufügen von Material einen Körper erzeugen bzw. urformen (VDI 2009). Als *Fertigungsverfahren* werden dabei allgemein alle Verfahren bezeichnet, welche die Herstellung von geometrisch bestimmten, festen Körpern ermöglichen (DIN 2003). Dabei sind die Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand eingeschlossen. Nach DIN 8580 (2003) erfolgt eine Untergliederung in sechs Hauptgruppen:

## 2 Grundlagen

---

1. Urformen
2. Umformen
3. Trennen
4. Fügen
5. Beschichten
6. Stoffeigenschaft ändern

Jede Hauptgruppe umfasst wiederum Gruppen und Untergruppen. Die Eingliederung der additiven Fertigungsverfahren in dieses Ordnungssystem ist bis heute noch nicht eindeutig geklärt. Möglich ist die Schaffung einer neuen Hauptgruppe oder eine Zuordnung zu mehreren bereits vorhandenen Hauptgruppen (ZÄH 2006). Die Grundlagen der additiven Verfahren wurden in den 1980er Jahren erarbeitet (HULL 1984). Verglichen mit anderen Fertigungsverfahren wie zum Beispiel der Zerspanung handelt es sich bei den additiven Fertigungsverfahren noch um eine junge Technologie. Mit der steigenden Anzahl an Verfahrensvarianten (DECKARD 1986; MEINERS ET AL. 2001) wuchs auch die Menge an alternativen Bezeichnungen. Diese gaben teils bereits beschriebene Sachverhalte mit anderen Worten wieder oder konnten nicht klar definiert werden (VDI 2009). Als Synonyme mit regional unterschiedlicher Verwendung können die Begriffe *Rapid-Technologien*, *Generative Fertigung*, *Additive Manufacturing* und *Solid Freeform Fabrication* genannt werden. Im Zuge aktueller Bestrebungen zur Normung sollen diese heterogenen Bezeichnungen in eine einheitliche Systematik überführt werden (ASTM 2010; VDI 2009). Durch eine verbindliche Beschreibung der Verfahren soll dies auch unerfahrenen Anwendern eine einfache Nutzung der Technologie möglich machen (ZÄH 2006).

Für die vorliegende Arbeit wird einheitlich die Bezeichnung *additive Fertigung* für den Fertigungsprozess und in Anlehnung an DIN 8580 (2003) die Bezeichnung *Werkstück* für das Erzeugnis des Fertigungsprozesses verwendet. Dienen die Werkstücke zum Zwecke einer Prüfung, so wird die Bezeichnung *Probekörper* verwendet.

### 2.2.2 Systemtechnische Analyse eines additiven Fertigungssystems

Trotz der Vielzahl an unterschiedlichen Verfahrensarten folgen die Fertigungssysteme und Fertigungsabläufe einer ähnlichen Struktur bzw. einem ähnlichen Schema. Allen Verfahren gemeinsam ist das regelmäßige Hinzufügen von Material zum Aufbau eines Werkstücks. In Abbildung 2 ist ein beliebiges additives Fertigungssystem auf einem hohen Abstraktionsniveau dargestellt (sog. Black-box-Darstellung).



## 2 Grundlagen

---

*Tabelle 1: Beschreibung relevanter Komponenten eines additiven Fertigungssystems*

<b>Funktion der Komponente</b>	<b>Ausführungsbeispiele</b>
Bereitstellung von Energie, durch welche durch Einbringung in das Ausgangsmaterial ein geometrisch bestimmter fester Körper erzeugt wird	Elektronenstrahlkanone, Laser, Heizung, UV-Lampe
Gezielte Lenkung und Formung der bereitgestellten Aktivierungsenergie zur selektiven Einbringung in das Ausgangsmaterial	Magnetspule, Galvanometerantrieb, Schrittmotor
Gezielte Anpassung der Eigenschaften des Bauraumes zur Erreichung von Prozessbedingungen	Heizung, Inertgasversorgung
Applizierung des Ausgangsmaterials mit definierten Eigenschaften zur nachfolgenden Überführung in einen geometrisch bestimmten, festen Körper	Pulverbeschickung, Materialzuführung, Wischer
Bereitstellung von Signalen zur Ansteuerung aller am Fertigungsprozess beteiligten Komponenten und Interaktion mit dem Anlagenbediener	Computer, speicherprogrammierbare Steuerung
Bereitstellung eines Bereiches zur Aufnahme der additiv gefertigten Werkstücke	Prozesskammer, Arbeitsplattform

Die senkrecht zur Aufbaurichtung stehende Fläche des verfügbaren Bauraumes wird dabei als Arbeitsplattform bezeichnet. Die Achsen in einem additiven Fertigungssystem werden durch ein orthogonales Koordinatensystem beschrieben, dessen Ursprung an einem Eckpunkt der Arbeitsplattform liegt (vgl. Abbildung 3).

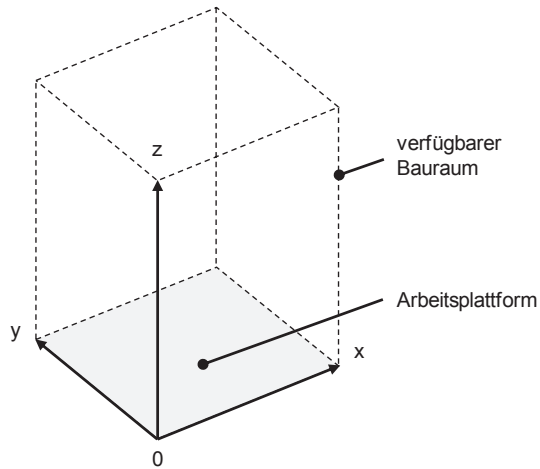


Abbildung 3: Beschreibung des  $x$ - $y$ - $z$ -Achsensystems im Bauraum eines additiven Fertigungssystems

Mit  $x$  wird dabei die Achse bezeichnet, welche parallel zum Fahrweg der Pulverbeschickung verläuft. Die  $z$ -Achse verläuft in der Richtung, in welcher die Werkstücke innerhalb des verfügbaren Bauraumes schichtweise gefertigt werden. Die  $y$ -Achse ergibt sich aus der Forderung, dass das Koordinatensystem ein Rechtssystem bildet. Findet entlang der  $x$ -Achse eine Pulverbeschickung in beiden Richtungen ( $+x$ ,  $-x$ ) statt, dann wird die  $y$ -Achse so gewählt, dass sich die Baufäche im ersten Oktanten des resultierenden Koordinatensystems befindet. Die Positionen im verfügbaren Bauraum werden dann vollständig durch positive Koordinaten referenziert.

### 2.2.3 Prozessablauf in der additiven Fertigung

#### 2.2.3.1 Allgemeines

Die additiven Fertigungsverfahren folgen dem Grundgedanken einer werkzeuglosen Herstellung komplexer, kundenindividueller Werkstücke (WARTZACK ET AL. 2010). Zur Generierung werden keine speziell angepassten Vorrichtungen oder werkstückspezifischen Programme benötigt. Die Flexibilität wird dadurch erreicht, dass der Prozessablauf vollständig vom 3D-CAD-Datensatz des Werkstücks abgeleitet wird. Der Vorgang von der Konstruktion bis zur Auslieferung

## 2 Grundlagen

des gefertigten Werkstücks kann in vier Phasen untergegliedert werden (vgl. Abbildung 4).

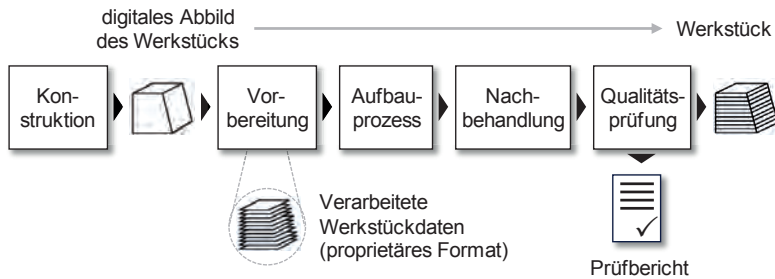


Abbildung 4: Prozessablauf der additiven Fertigung (in Anlehnung an VDI 3404 (2009))

### 2.2.3.2 Vorbereitung

Die Vorbereitungsphase umfasst sämtliche Tätigkeiten, welche zeitlich zwischen der Konstruktion und dem Beginn des Aufbauprozesses liegen. Sie kann untergliedert werden in die Teilschritte *Generierung der Fertigungsdaten* und *Maschinenvorbereitung*. Die zeitliche Abfolge ist beliebig und kann sowohl parallel als auch sequenziell sein. Nachfolgend werden die beiden Teilschritte beschrieben.

#### Generierung der Fertigungsdaten

Für die Konstruktion von Werkstücken werden heute üblicherweise 3D-CAD-Systeme eingesetzt. Dabei wird das digitale Modell eines dreidimensionalen Körpers entwickelt, dessen Gestalt vollständig über mathematische Funktionen (z. B. Splines) definiert ist. Charakteristisch für diese Darstellung ist, dass komplexe Freiformflächen (z. B. gekrümmte Oberflächen) effizient durch wenige Parameter beschrieben werden können (PAHL 1990). Trotz der vergleichbaren Datenrepräsentation innerhalb unterschiedlicher CAD-Systeme hat sich noch kein Standard-Datenformat etabliert. Ein Austausch von Daten zwischen unterschiedlichen Systemen ist nur mit einem hohen Konvertierungsaufwand möglich.

Unabhängig vom Systemursprung können 3D-CAD-Daten nicht direkt von den additiven Fertigungsmaschinen verarbeitet werden, sondern sie müssen zuvor eine Konvertierung durchlaufen (SCHILLEN 2002). Dabei werden die Oberflächen des 3D-CAD-Modells durch die Anwendung einer Triangulation in ebene Dreie-



cke (sog. Facetten) im STL-Format (Standard Triangulation Language) überführt. Insbesondere bei Freiformflächen kommt es hierbei zu mitunter hohen Abweichungen von der idealen Geometrie, welche durch die Größe der Facetten bestimmt werden (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Schematische Darstellung eines triangulierten 3D-CAD-Modells am Beispiel einer Kugel (in Anlehnung an KADDAR (2010))

Die Abweichung kann durch eine Erhöhung der Facettenanzahl beliebig verringert werden. Das bedeutet jedoch auch zwingend eine Erhöhung des Aufwands zur Speicherung und Verarbeitung der Daten. Trotz des bekannten STL-Formats kann es bei der Konvertierung zu Fehlern kommen, welche eine teilweise aufwendige Reparatur der Daten notwendig machen. Die Fehler können primär auf die hohe Redundanz der Daten zurückgeführt werden (SCHILLEN 2002), da Mehrdeutigkeiten durch algorithmische Unzulänglichkeiten nicht vollständig erfasst und behandelt werden.

Um den möglichen Bauraum einer additiven Fertigungsmaschine effektiv ausnutzen zu können, wird oftmals eine Vielzahl unterschiedlicher 3D-CAD-Modelle in einem Bauprozess hergestellt. Dabei ist es erforderlich, die facettierten Modelle mithilfe spezialisierter Programme im verfügbaren Bauraum des Fertigungssystems so zu positionieren und zu orientieren, dass eine möglichst hohe Packungsdichte erzielt wird. Die Packungsdichte ist dabei definiert als das Verhältnis der Summe aller Werkstückvolumina zu dem Volumen des verfügbaren Bauraumes. Abhängig vom gewählten Fertigungsverfahren und vom Material müssen zusätzliche Stützstrukturen angebracht und die Randbedingungen bezüglich der geeigneten Orientierung des Werkstücks im Bauraum eingehalten werden. Die notwendigen Schritte werden überwiegend manuell durchgeführt. Das Ergebnis ist somit vom Anwender abhängig. In einem abschließenden Schritt

## 2 Grundlagen

---

werden die 3D-CAD-Modelle in einzelne Schichten unterteilt und die jeweiligen Werkstückkonturen mit einer Vielzahl an Spuren zur selektiven Energieeinbringung versehen (sog. Scanmuster). Die dabei erzeugten Fertigungsdaten liegen in einem proprietären Format vor, das manuell nicht geändert oder eingesehen werden kann.

### Maschinenvorbereitung

Um das additive Fertigungssystem in einen baubereiten Zustand zu versetzen, sind vor dem Start des Aufbauprozesses Tätigkeiten wie das Reinigen, Inertisieren und Temperieren des Bauraumes sowie das Konditionieren und Bereitstellen des Werkstoffs und der benötigten Komponenten durchzuführen. Die Tätigkeiten werden überwiegend manuell verrichtet und erfolgen entsprechend der Herstellervorgabe oder der unternehmensinternen Richtlinien (vgl. EOS (2008), EOS (2009)).

### 2.2.3.3 Aufbauprozess

Die detaillierte Darstellung des Aufbauprozesses ist stark verfahrensspezifisch. Die Gemeinsamkeiten der einzelnen Verfahren liegen im sukzessiven elementweisen oder schichtweisen Hinzufügen von Material zur Erzeugung eines Körpers (VDI 2009). Der Aufbauprozess folgt einem sich wiederholenden Ablauf, welcher für jede zu generierende Schicht durchgeführt werden muss (vgl. Abbildung 6).

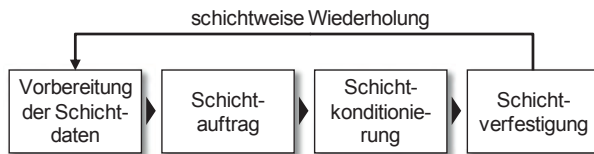


Abbildung 6: Schematische Darstellung des schichtweisen Aufbauprozesses

Diese schematische Darstellung des schichtweisen Aufbauprozesses gilt für alle additiven Verfahren nach VDI 3404 (2009). Es können sich jedoch verfahrensspezifische Unterschiede z. B. in der Dauer einzelner Schritte ergeben.

### 2.2.3.4 Nachbehandlung

Die Nachbehandlung erfolgt nach dem vollständigen Aufbau des Werkstücks. Nach VDI 3404 (2009) fallen hierunter Tätigkeiten, durch welche ausgewählte

Eigenschaften der Werkstücke wie Oberflächengüte, mechanische Eigenschaften und Haptik gezielt verbessert werden sollen. Zur Durchführung werden die bei der Weiterverarbeitung konventionell gefertigter Werkstücke üblichen Verfahren und Tätigkeiten angewendet.

### 2.2.3.5 Qualitätsprüfung

Das Ziel der Qualitätsprüfung ist es, zu evaluieren, ob die vom Anwender für das Werkstück spezifizierten Anforderungen eingehalten werden. Eine vollständige Prüfung aller Werkstückeigenschaften ist weder wirtschaftlich noch technologisch sinnvoll (VDI 2009). Die erforderlichen Untersuchungen sind stets in Abhängigkeit vom Verwendungszweck des Werkstücks festzulegen. In der Praxis ergeben sich dabei große Bandbreiten, welche sich mitunter von einer einfachen visuellen Inspektion (z. B. Sichtprüfung) des Werkstücks bis hin zu werkstofflichen Untersuchungen erstrecken. Abhängig von den Anforderungen wird ein Prüfbericht mit dem erforderlichen Detaillierungsgrad angefertigt, welcher eine Auskunft über die Einhaltung der Anforderungen geben soll.

## 2.3 Methoden zur Fähigkeitsuntersuchung

### 2.3.1 Allgemeines

VDMA 8669 (1999) beschreibt das Vorgehen zur Durchführung von Fähigkeitsuntersuchungen speziell zur Abnahme spanender Fertigungsmaschinen. Das Ziel hierbei ist der Nachweis, „dass die Maschine bzw. der Prozess in der Lage ist, über einen langen Zeitraum die geforderte Toleranz mit definierter Sicherheit zu den Grenzen einzuhalten“ (VDMA 1999). Verallgemeinert auf einen beliebigen Fertigungsprozess ist dieser dann als *fähig* zu bezeichnen, wenn unter den vorstehend genannten Bedingungen ein gefordertes Ergebnis dauerhaft produziert werden kann.

Das Vorgehen zur Ermittlung und zur Bewertung der Prozessfähigkeit wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Abbildung 7 zeigt, wie ausgehend von den an ein Produkt gestellten Anforderungen, z. B. in Form von Toleranzen, eine Bewertung mit Hilfe von Kennzahlen erzielt werden kann. Einleitend ist hierfür der Nachweis der Prüfmittelfähigkeit für das verwendete Prüfmittel zu erbringen. Anschließend kann die eigentliche Ermittlung der Prozessfähigkeit durchgeführt werden.

## 2 Grundlagen

---



Abbildung 7: Vorgehen zur Bewertung der Prozessfähigkeit

### 2.3.2 Toleranzen

Toleranzen bilden die Grundlage für die vollständige Austauschbarkeit von Werkstücken und ermöglichen die örtliche und zeitliche Trennung der Fertigung (KLEIN 2006). Kunden erwarten von einem Erzeugnis, dass es spezifische Merkmale bzw. bestimmte Mindestanforderungen erfüllt. Die Beschreibung dieser Merkmale wird gewöhnlich unter Zuhilfenahme von Toleranzen vorgenommen (WESTKÄMPER & WARNECKE 2010). Diese geben Mindest- und/oder Höchstwerte der Merkmale an, welche durch den Fertigungsprozess zu realisieren sind. Ursächlich für die Abweichungen der Merkmale von einem spezifizierten Nennwert sind unvermeidbare Störeinflüsse auf den Fertigungsprozess (RINNE & MITTAG 1999). Die Toleranzen müssen nach den funktionalen Anforderungen an das Werkstück bzw. an das Formelement ausgewählt werden. Spezielle Voraussetzungen oder Restriktionen eines Fertigungsverfahrens können bei der Zuweisung mit einbezogen werden (DIN 2008). Zu berücksichtigen ist jedoch die Kostenwirksamkeit bei der Wahl von Toleranzen, da sich die Herstellungskosten mit einer Reduzierung der Weite von Toleranzfeldern erhöhen (KLEIN 2006). Werden höhere Anforderungen festgelegt, als nötig, können dadurch unnötige Mehrkosten in der Fertigung und der Qualitätssicherung entstehen (KLEIN 2006). Die Anforderungen sind für jedes Werkstück so gering wie möglich zu wählen.

Zur Vereinfachung der Spezifizierung können die Formelemente eines Werkstücks auch mit Allgemeintoleranzen versehen werden. Die Normen DIN ISO 2768-1 (1991b) und DIN ISO 2768-2 (1991a) enthalten Allgemeintoleranzen für Längen- und Winkelmaße bzw. Form und Lage, aufgeteilt auf insgesamt vier (DIN 1991B) bzw. drei (DIN 1991A) Toleranzklassen.

Wegen der grundlegenden Relevanz von Toleranzen für den gesamten Produktentstehungsprozess sind diese bereits für eine Vielzahl an Werkstückmerkmalen in internationale Normen überführt. Durch die Einführung der geometrischen Produktspezifikation (GPS), formuliert in der ISO TR 14638, soll „eine widerspruchsfreie und vollständige Normierung der Form, der Maße und der Oberflä-

chencharakteristik eines Werkstücks“ erreicht werden (WESTKÄMPER & WARNECKE 2010).

### 2.3.3 Prüfmittelfähigkeit

Zur Feststellung der Einhaltung geforderter Toleranzen eines gefertigten Werkstücks (vgl. Abschnitt 2.3.2) ist es zuvor notwendig, die Fähigkeit des verwendeten Prüfmittels nachzuweisen. Ein *Prüfmittel* wird nach VDI/VDE/DGQ 2618 (2001) definiert als ein Messmittel, welches „zum Nachweis der Konformität bezüglich festgelegter Qualitätsanforderungen“ benutzt wird. DIN EN ISO 10012 (2004) beschreibt ein *Messmittel* wiederum als „Messgerät, Software, Messnormal, Referenzmaterial oder Hilfsmittel oder eine Kombination davon, benötigt für einen Messprozess“. Um die Eignung eines Prüfmittels festzustellen, ist die alleinige Betrachtung der vom Hersteller angegebenen Messunsicherheit nicht ausreichend. Da diese Werte unter Idealbedingungen (z. B. in Abhängigkeit vom Einsatzort, vom Bediener<sup>1</sup> und bei Anwendung auf reale Werkstücke) ermittelt wurden, ist davon auszugehen, dass unter Realbedingungen (z. B. in Bezug auf den Einsatzort, verschiedene Bediener, reale Werkstücke) die Prüfmittelfähigkeit sinkt (PFEIFER 1993). Die Ermittlung der Fähigkeit des Prüfmittels wird durchgeführt, um die „Messabweichungen zu quantifizieren und ggf. über die Vernachlässigbarkeit von Messfehlern entscheiden zu können“ (RINNE & MITTAG 1999). Zur Feststellung der Prüfmittelfähigkeit wird nach DIETRICH (2005) ein mehrstufiger Ablauf empfohlen, durch welchen die Eignung des Prüfmittels für gegebene Randbedingungen schrittweise ermittelt werden kann. Diese Vorgehensweise wurde nach den Anforderungen der Automobilbranche entwickelt. Die zentralen Schritte werden nachfolgend wiedergegeben. Bezüglich des vollständigen Ablaufs wird auf DIETRICH (2005) verwiesen.

- 1. Schritt: Überprüfung der Auflösegenauigkeit des Messsystems  
Ein Messsystem ist nur dann als ausreichend genau anzusehen, wenn die Auflösung  $R$  der Messeinrichtung maximal 5 % des gesetzten Toleranzfeldes  $T$  beträgt (vgl. Formel (1)) (DIETRICH & SCHULZE 2007). Es muss also gelten:

$$\frac{R}{T} \cdot 100 \% \leq 5 \% \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Zur Vereinfachung des Leseflusses wird das generische Maskulinum verwendet.

## 2 Grundlagen

---

Wird die vorstehend beschriebene Grenze durch die Auflösegenauigkeit überschritten, so ist das Messsystem für die Messaufgabe nicht prüfmittelfähig. Im Falle einer ausreichend hohen Auflösegenauigkeit ist mit dem 2. Schritt fortzufahren.

- 2. Schritt: Überprüfung der Eignung des Messsystems bei Verwendung eines Normals bei Betriebsbedingungen (Verfahren 1, engl. type-1 study)  
Durch mehrmaliges Messen (Anzahl der Messungen  $\geq 25$ ) eines Normals mit bekannter Streubreite sollen die vom Hersteller des Messsystems spezifizierten Werte unter den tatsächlich vorherrschenden Betriebsbedingungen überprüft werden. Es handelt sich dabei um eine Kurzzeitbeurteilung des Messsystems. Die ermittelte Prozessstreuweite wird dabei mit der bekannten Streuung des Messmittels in Beziehung gesetzt und anschließend bewertet (PFEIFER 1993). Abhängig vom Ergebnis der Bewertung kann das Messmittel als *geeignet* oder *nicht geeignet* für die gegebene Messaufgabe klassifiziert werden.

- 3. Schritt: Überprüfung des Bedienerinflusses (Verfahren 2, engl. type-2 study)  
Sofern es sich um kein automatisiertes Messverfahren handelt, ist der Einfluss des Bedieners auf die Messergebnisse zu überprüfen. Hierfür ist die Anzahl der Prüfer  $k$  ( $k \geq 2$ ), die Anzahl der über den Toleranzbereich verteilten realen Prüfobjekte  $p$  ( $p \geq 5$ ) und die Anzahl der Messungen pro Prüfer  $r$  ( $r \geq 2$ ) festzulegen. Der Wert des Produkts aus der Anzahl der Prüfer, der Anzahl der Prüfobjekte und der Anzahl der Messungen muss dabei den vorgegebenen Wert 30 erreichen bzw. überschreiten (vgl. Formel (2)) (DIETRICH 2005). Es muss gelten:

$$k \cdot p \cdot r \geq 30 \quad (2)$$

Die Prüfung muss zudem unter realen Einsatzbedingungen stattfinden. Vergleichbar mit Verfahren 1 erfolgt anhand definierter Kriterien eine Einordnung in die Gruppe *geeignet* oder *nicht geeignet*.

Zusammenfassend ist ein Messmittel als *fähig* und als *geeignet* für die Aufgabe zu bezeichnen, wenn die oben genannten Bedingungen durchwegs erfüllt werden können. Ein Messmittel ist als *nicht fähig* und deshalb als *nicht geeignet* zu bezeichnen, wenn mindestens eine der bereits beschriebenen Bedingungen nicht erfüllt werden kann bzw. wenn die aus den Messwerten gebildeten Kennzahlen die vorgegebenen Grenzen nicht einhalten. Anderenfalls ist es möglich, ein anderes Messmittel zu qualifizieren, die geforderten Toleranzen zu überprüfen und

gegebenenfalls zu vergrößern oder den Einfluss des Bedieners durch einen alternativen Messablauf zu reduzieren.

### 2.3.4 Prozessfähigkeit

Die Prozessfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Prozesses, „ein bestimmtes Merkmal in gleichbleibender Weise innerhalb der vorgegebenen Spezifikationsgrenzen zu erzeugen“ (DIETRICH & SCHULZE 2005). Untersuchungen zur Feststellung der Prozessfähigkeit dienen der Qualitätssicherung und sind notwendig, da jeder Fertigungsprozess unvermeidbaren Störeinflüssen unterliegt (RINNE & MITTAG 1999). Der Zweck einer Prozessbeurteilung ist, Kenntnisse über den jeweiligen Prozess zu erlangen, um diesen effizient und effektiv zu lenken (DIN 2007). Nach RINNE & MITTAG (1999) ist ein Qualitätsmerkmal grundsätzlich als eine Zufallsvariable zu betrachten. Für stochastische Abweichungen können mit deterministischen Methoden keine verwertbaren Aussagen getroffen werden. Es sind somit statistische Methoden notwendig, um die stochastischen Abweichungen berücksichtigen zu können. Insbesondere bei Einzelfertigungen und Prozessen mit einer nur geringen Ausbringungsmenge sind die Untersuchungen jedoch nicht immer sinnvoll, da eine zu geringe Datenbasis vorliegt, um eine akzeptable statistische Sicherheit zu erreichen. RINNE & MITTAG (1999) unterscheiden bei den unvermeidbaren Störeinflüssen zwischen fünf Einflussfaktoren (sog. 5 M), welche eine Wirkung auf die Prozessfähigkeit ausüben können (vgl. Abbildung 8).

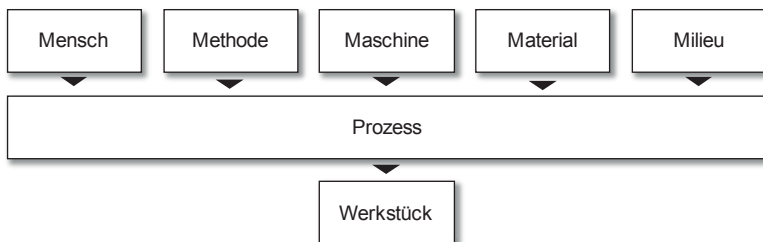


Abbildung 8: Einflussfaktoren industrieller Produktionsprozesse (nach RINNE & MITTAG 1999)

Der potenzielle Einflussfaktor *Messmittel* kann bei erfolgreichem Nachweis der Prüfmittelfähigkeit (vgl. Abschnitt 2.3.3) vernachlässigt werden. Die Einflussfaktoren *Mensch* und *Maschine* zählen als Produktionsfaktoren, die Einflussfaktoren *Material*, *Methode* und *Milieu* als Umgebungsfaktoren (RINNE & MITTAG 1999).

## 2 Grundlagen

---

Bezüglich der Relevanz der einzelnen Faktoren kann keine pauschale Aussage getätigt werden, da die Auswirkungen der Faktoren auf die Prozessfähigkeit nicht immer bekannt sind.

Bei den Untersuchungen zur Feststellung der Prozessfähigkeit muss zudem hinsichtlich der Dauer und des Umfangs zwischen den drei nachfolgend beschriebenen Typen unterschieden werden:

- **Kurzzeitige Prozessfähigkeit**  
Die Anwendung der kurzzeitigen Prozessfähigkeit hat zum Ziel, die prinzipielle Fähigkeit der Fertigungsmaschine zur Erreichung der geforderten Qualität zu ermitteln. Diese wird insofern auch als Maschinenfähigkeit bezeichnet und oftmals direkt bei der Abnahme beim Hersteller ermittelt (DIETRICH & SCHULZE 2005). Nach RINNE & MITTAG (1999) wird hierbei „nur der Einfluss von Produktionseinrichtungen und Messgeräten auf die Prozessfähigkeit unter weitgehender Konstanz anderer Einflussfaktoren ermittelt“. Dies ist darin begründet, dass stichprobenartig ausgewählte Werkstücke in einer so kurzen Zeitspanne ausgewertet werden, dass nicht alle in Abbildung 8 genannten Faktoren Einfluss nehmen können (RINNE & MITTAG 1999).
- **Vorläufige Prozessfähigkeit**  
Durch einen Nachweis der vorläufigen Prozessfähigkeit soll die Fähigkeit der Fertigungsmaschine unter realen Einsatzbedingungen nachgewiesen werden. Unter *real* sind die Einsatzbedingungen zu verstehen, welche auch im späteren Anwendungsfall auftreten. Es handelt sich bei dem Nachweis um einen einmaligen Vorgang, welcher vor dem Beginn der Serienfertigung eines Werkstücks durchgeführt werden muss. Abweichend zum Vorgehen beim Nachweis der kurzzeitigen Prozessfähigkeit werden Werkstücke über einen längeren Zeitraum stichprobenartig ausgewertet. Hierdurch wirken sich alle in Abbildung 8 aufgelisteten Einflussfaktoren auf das Prozessergebnis aus. Ferner dient die Ermittlung der vorläufigen Prozessfähigkeit zur Definition von Warn- und Eingriffsgrenzen, welche in der nachfolgend beschriebenen langfristigen Prozessfähigkeit berücksichtigt werden.
- **Langfristige Prozessfähigkeit**  
Durch Untersuchungen zur Ermittlung der langfristigen Prozessfähigkeit wird beabsichtigt, einen bereits als *kurzzeitig* oder *vorläufig* fähig bezeichneten Fertigungsprozess kontinuierlich und über längere Zeit (d. h. während der Serienproduktion) auf signifikante Veränderungen zu überwachen (DIETRICH & SCHULZE 2005). Stichprobenartig ausgewählte Werkstücke werden dabei



ausgewertet und die Ergebnisse z. B. mit Hilfe von Qualitätsregelkarten überprüft. Bei Überschreiten definierter Warn- oder Eingriffsgrenzen sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, durch welche das Merkmal wieder in den gewünschten Bereich gelangt. Die Methoden der langfristigen Prozessfähigkeit eignen sich vornehmlich für die Großserienfertigung. Durch eine Adaption können diese eingeschränkt jedoch auch in der Fertigung von Kleinserien Verwendung finden (KOCZY 1998).

Unabhängig von der zeitlichen Einordnung und der Anzahl der Merkmale für die zu ermittelnde Prozessfähigkeit müssen Prozesse, welche in einer Fertigung eingesetzt werden sollen, sowohl beherrscht als auch fähig sein. Abbildung 9 stellt den Zusammenhang zwischen der Prozessstreuung, dem Toleranzfeld und den Attributen *fähig* und *beherrscht* dar.

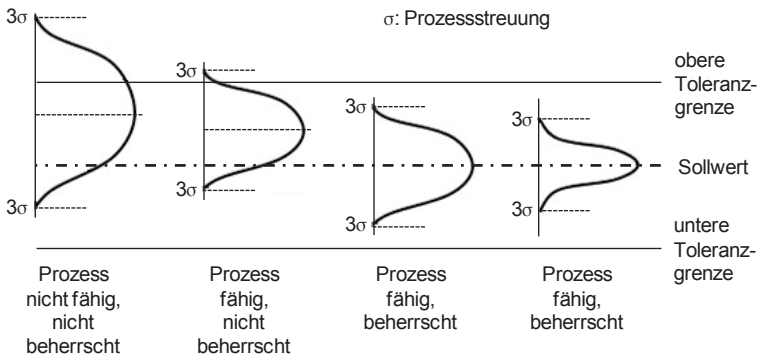


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Prozessstreuung, Toleranzfeld und den Attributen *fähig* und *beherrscht* (in Anlehnung an TÖPFER (2007))

Unter der Annahme, dass der Fertigungsprozess einer normalverteilten Streuung unterliegt, befinden sich 99,73 % aller Prozessergebnisse im Intervall  $[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$ . Das Attribut *fähig* kann einem Prozess zugeordnet werden, wenn die Streuung eines Merkmalswertes ein definiertes Toleranzfeld im Bereich  $[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$  nicht überschreitet. Ein Prozess gilt zusätzlich als *beherrscht*, wenn „das zu überwachende Qualitätsmerkmal einer zeitinvarianten Verteilung folgt“ (RINNE & MITTAG 1999) und der Prozess bezüglich seiner Streuung nur zufälligen Ursachen unterliegt (VDI 2007). Bei einem beherrschten Prozess werden die Grenzen des Toleranzfeldes mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,73 % nicht überschritten.

Zur Quantifizierung der Prozessfähigkeit werden häufig Kennzahlen verwendet, welche nachfolgend beschrieben werden.

### 2.3.5 Kennzahlen

„Kennzahlen sind absolute oder relative Größen, die problembezogene Informationen komprimiert ausdrücken“ (GROTH 1992). In einem komplexen System, wie es ein Produktionsprozess bzw. allgemein ein Unternehmen darstellt, kann eine Vielzahl an Daten erhoben werden. Um von diesen Daten Rückschlüsse auf den Status des beobachteten Systems ziehen zu können, ist eine Aufbereitung der Daten notwendig. Zur Abbildung unterschiedlicher Sachverhalte und Prozesse innerhalb eines Unternehmens werden deshalb Kennzahlen verwendet (DIETRICH ET AL. 2007). Kennzahlen können synonym auch als Indizes bezeichnet werden. Sie dienen nicht nur der Beobachtung aktueller Zustände, sondern können Schwachstellen rechtzeitig aufdecken, und sie können als Grundlage für Beurteilungen und Entscheidungen herangezogen werden (KLETTI & SCHUMACHER 2011; WENDT 1956). Kennzahlen beziehen sich hauptsächlich auf betriebswirtschaftliche Unternehmensdaten und weniger auf Werte aus dem Fertigungs- und Produktionsbereich (DIETRICH ET AL. 2007), obgleich sie auch hierfür herangezogen werden können. Dies ist dadurch begründet, dass betriebswirtschaftliche Daten einfach ermittelt werden können und Vergleichswerte aus unterschiedlichen Unternehmen und Branchen verfügbar sind. Zur Bildung einer Kennzahl in der industriellen Produktion sind nach DIETRICH ET AL. (2007) statistische Verfahren einzusetzen. Dies ist insbesondere bei wiederkehrenden Aufgaben bzw. bei der Auswertung regelmäßig hergestellter Werkstücke möglich, da für diese eine umfangreiche Datenbasis vorhanden ist.

Eine Datenbasis umfasst eine Sammlung von zusammengehörigen Einzelwerten, welche beispielsweise messtechnisch erfasst wurden. Die Sammlung kann dabei einen Umfang aufweisen, welcher ohne Hilfsmittel nicht mehr überschaubar ist. Bei der Ableitung einer Kenngröße wird die Menge an Einzelwerten mithilfe einer definierten Operation auf einen Einzelwert verdichtet. Von einer Datenbasis können dabei unterschiedliche Kenngrößen abgeleitet werden. Nach DIETRICH ET AL. (2007) können Kennzahlen aus zwei oder mehreren Kenngrößen sowie durch die Verrechnung einer bzw. mehrerer Kenngrößen mit einer Bezugsgröße bestimmt werden. Abbildung 10 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Datenbasis, Kenngröße und Kennzahl.

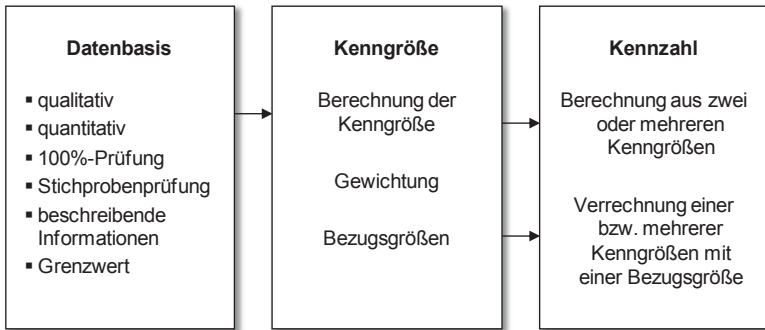


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Datenbasis, Kenngröße und Kennzahl (in Anlehnung an DIETRICH ET AL. (2007))

Abhängig vom Rezipienten einer Kennzahl werden die Informationen unterschiedlich stark abstrahiert. Da eine Abstraktion zwingend mit einem Verlust an Informationen einhergeht, ist darauf zu achten, dass eine Fehlinterpretation aufgrund zu hoher Abstraktion vermieden wird.

Zur Quantifizierung der in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Prozessfähigkeit werden vielfach die Kennzahlen bzw. Indizes  $C_p$  (vgl. Gleichung (3)) und  $C_{pk}$  (vgl. Gleichung (4)) eingesetzt (DIETRICH & SCHULZE 2005). So beschreibt der Prozessfähigkeitsindex  $C_p$  die Prozessfähigkeit in Bezug auf ein festgelegtes Toleranzfeld  $T$ , welches durch das Intervall zwischen der oberen Toleranzgrenze  $OTG$  und der unteren Toleranzgrenze  $UTG$  gebildet wird (RINNE & MITTAG 1999; VDI 2007).  $\hat{\sigma}$  bezeichnet den Schätzwert für die Prozessstreuung,  $\mu$  bezeichnet den Mittelwert der für das Merkmal erfassten Messwerte. Es gilt:

$$C_p = \frac{T}{6\hat{\sigma}} = \frac{OTG - UTG}{6\hat{\sigma}} \quad (3)$$

$$C_{pk} = \frac{\min(OTG - \mu; \mu - UTG)}{3\hat{\sigma}} \quad (4)$$

Da für die vorliegende Arbeit primär die Maßhaltigkeit betrachtet wird, wird bezüglich des Toleranzfeldes  $T$  von einem symmetrischen Fall für zweiseitig begrenzte Merkmale ausgegangen. Für einseitig begrenzte Merkmale (z. B. Härte, Rauheit) sind alternative Möglichkeiten zur Quantifizierung der Prozessfähigkeit verfügbar.

## 2 Grundlagen

---

Die kritische Prozessfähigkeit  $C_{pk}$  erweitert die Prozessfähigkeit  $C_p$  um eine Aussage bezüglich der Lage relativ zum Mittelwert. Eine für alle Anwendungsbereiche gültige Festlegung von Grenzwerten ist für die genannten Fähigkeitskennzahlen nicht möglich (DIETRICH & SCHULZE 2005). Tabelle 2 listet einige typische minimale Grenzwerte auf.

Tabelle 2: Typische minimale Grenzwerte für Fähigkeitskennzahlen (in Anlehnung an DIETRICH & SCHULZE (2005))

	$C_p$	$C_{pk}$
Kurzzeitige Prozessfähigkeit	2,3	2,0
Vorläufige Prozessfähigkeit	2,0	1,67
Langfristige Prozessfähigkeit	1,33	1,33

Durch die hohe Abstraktion von Kennzahlen können komplexe Sachverhalte einfach miteinander verglichen werden. Bei der Verwendung von Kennzahlen ist zu beachten, dass sich diese lediglich zur Beschreibung eines Sachverhalts eignen, nicht zur direkten Verbesserung eines Produkts. Sie können jedoch als Auslöser für Verbesserungsmaßnahmen dienen (DIETRICH & SCHULZE 2005). Zudem muss berücksichtigt werden, dass die jeweils vorgegebenen Voraussetzungen für die Bildung der Kennzahl erfüllt werden müssen (DIETRICH & SCHULZE 2005).

### 2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen der für das Verständnis der Arbeit relevanten Themen aus dem Bereich der additiven Fertigung sowie Methoden zur Fähigkeitsuntersuchung erläutert.

Ein additives Fertigungssystem kann dabei allgemein als ein System betrachtet werden, welches Systemeingänge in Systemausgänge überführt. Trotz der Vielfalt an unterschiedlichen Verfahrensarten sind die Funktionen zur Überführung der Eingänge in die Ausgänge ähnlich und durch eine sukzessive, elementweise Tätigkeit geprägt. Die konstruktiven Umsetzungen der Verfahren weisen untereinander Ähnlichkeiten auf und können auf wenige zentrale Komponenten zurückgeführt werden. Zudem wurden der Prozessablauf in der additiven Fertigung dargelegt und die Haupttätigkeiten der Phasen *Vorbereitung*, *Aufbauprozess*, *Nachbehandlung* und *Qualitätssicherung* erläutert.

In diesem Kapitel wurden des Weiteren die notwendigen Schritte zur Bestimmung der Prozessfähigkeit diskutiert. Die an ein Werkstück gebundenen Anforderungen können dabei mit Hilfe von Toleranzen konkretisiert werden. Zur Überprüfung der Einhaltung der Toleranzen ist ein Nachweis der Fähigkeit des verwendeten Prüfmittels erforderlich. Der mehrstufige Ablauf zur Bestimmung dieser Prüfmittelfähigkeit wurde deshalb beleuchtet.

Im nachfolgenden Kapitel werden der Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Ausprägungen und die Ursachen einer geringen Prozessfähigkeit sowie Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung diskutiert.



## **3 Stand der Wissenschaft und Technik**

### **3.1 Vorgehen im Kapitel**

Basierend auf den Grundlagen in Kapitel 2 werden im Folgenden aktuelle Bestrebungen zur Weiterentwicklung der additiven Fertigungsverfahren und daraus abgeleitet der Wissenschaft und Technik dargestellt. Das vorliegende Kapitel ist in drei Abschnitte untergliedert. Im ersten Abschnitt werden die Gestaltabweichungen additiv gefertigter Werkstücke diskutiert. Diese umfassen sowohl die äußere Gestalt (Formabweichungen) als auch besondere Merkmale im Werkstoffgefüge (Gitteraufbau) des Werkstücks. Im zweiten Abschnitt werden, aufbauend auf vorhandenen Ursache-Wirkungs-Diagrammen, Faktoren behandelt, welche einen negativen Einfluss auf die Prozessfähigkeit haben können. Abschließend werden Forschungsarbeiten dargestellt, welche durch unterschiedliche Tätigkeiten und Ansätze die Erhöhung der Prozessfähigkeit anstreben.

### **3.2 Gestaltabweichungen additiv gefertigter Werkstücke**





#### **3.2.1 Allgemeines**

Die Herstellung von Werkstücken mit einer geometrisch idealen Oberfläche ist aus fertigungstechnischen Gründen nicht möglich, da es zu Unebenheiten durch die Bearbeitungsverfahren kommt (MATEK ET AL. 2011). Dies ist unabhängig vom verwendeten Fertigungs- oder Bearbeitungsverfahren und weiterhin verallgemeinerbar auf beliebige Werkstückeigenschaften. Durch Störgrößen, welche sich auf den Prozess auswirken, sind Abweichungen von den idealen Werkstückmerkmalen nicht vermeidbar (vgl. Abschnitt 2.3.4 ab Seite 19). Nach DIN 4760 (1982) werden Gestaltabweichungen als „die Gesamtheit aller Abweichungen der Istoberfläche von der geometrischen Oberfläche“ bezeichnet. Nach BROMME (1996) sind real auftretende Gestaltabweichungen „durch verschiedene Ereignisse im Fertigungsprozess determiniert, von denen angenommen wird, dass diese stets unabhängig voneinander wirken“. Auf die Oberfläche eines Werkstücks wirken sich Prozessereignisse aus, „deren Charakter und Größe oft unbekannt sind“ (BROMME 1996). DIN 4760 (1982) definiert sechs verschiedene Ordnungen von Gestaltabweichungen (vgl. Tabelle 3), welche von der Formabweichung des Werkstücks bis zum Gitteraufbau des Werkstoffs innerhalb des

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

Werkstücks reichen. Es können somit alle Defizite, die an einem Werkstück auftreten, klassifiziert werden.

*Tabelle 3: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen (in Anlehnung an DIN 4760 (1982))*

Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache bei konventionellen Fertigungsverfahren
1. Ordnung: Formabweichungen 	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheitsabweichung	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegen der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen	außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeugs
3. Ordnung: Rauheit 	Rillen	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeugs
4. Ordnung: Rauheit 	Riefen, Schuppen, Kuppen	Vorgang der Spanbildung, Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: Rauheit nicht darstellbar	Gefügestruktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung, Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: nicht darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffes	

Die genannten Entstehungsursachen für die Gestaltabweichungen beziehen sich vorwiegend auf konventionelle Fertigungsverfahren wie die Zerspanung. Aufgrund der werkzeugfreien Fertigung der additiven Verfahren (WARTZACK ET AL. 2010) müssen die Gestaltabweichungen schichtweise hergestellter Werkstücke deshalb auf andere Entstehungsursachen zurückgeführt werden.

Im Bereich der additiven Fertigungsverfahren haben sich Termini für typische Werkstück- und Prozessdefizite gebildet, welche Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten sind. Technologieanwender verwenden diese Fachausdrücke, um eine geforderte Qualität der generierten Werkstücke genauer zu spezifizieren. Die potenziellen Auswirkungen der Defizite können durch die Fachausdrücke oftmals anschaulicher dargestellt werden, als durch eine Rückführung auf die



Gestaltabweichungen nach DIN 4760 (1982). Ein Vergleich der additiven Fertigung mit konventionellen Verfahren ist dann jedoch nicht mehr möglich. Nicht alle Arten von Gestaltabweichungen treten bei allen additiven Verfahren gleich dominant auf (IBRAHIM ET AL. 2009). Nachfolgend werden der Stand der Erkenntnisse bezüglich der Entstehung von geometrischen Werkstückdefiziten und deren Auswirkungen erläutert.

#### 3.2.2 Schrumpfung (engl.: thermal shrinkage)

Der Effekt *Schrumpfung* wird oftmals gleichgesetzt mit dem im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Effekt *Schwindung*. Dabei bezeichnet Schrumpfung die Volumen- bzw. Porositätsänderung eines unverfestigten Ausgangsmaterials (z. B. Pulverschüttung, flüssiges Polymer), wenn dieses mit einer Aktivierungsenergie (z. B. Laserstrahlung, Bindereintrag) beaufschlagt wird und ein Aufschmelz-, Sinter- bzw. Polymerisationsvorgang stattfindet (BRANNER 2011; CELI 1995; LUTZMANN 2011; YANG ET AL. 2002). Einen wesentlichen Einfluss auf das Ausmaß der Schrumpfung hat dabei die Packungsdichte des Ausgangsmaterials (KELLER 1999). Abbildung 11 stellt die Volumenreduktion eines Ausgangsmaterials bei einem Schmelzvorgang dar. Das Ausgangsmaterial weist dabei eine Schüttdichte auf, die unterhalb der physikalischen Werkstoffdichte liegt.

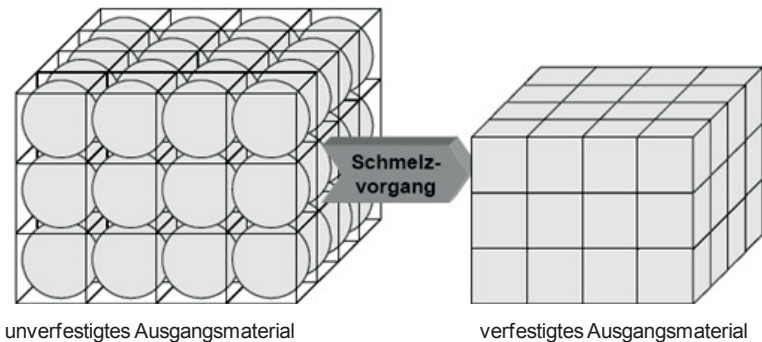


Abbildung 11: Schmelzvorgang als Ursache für Schrumpfung (in Anlehnung an LUTZMANN (2011))

Bedingt durch die Volumenreduktion des prozessierten Ausgangsmaterials steigt die Dicke der nächsten applizierten Schicht (MEINERS 1999). Die Folge ist, dass die Dicke der vom Beschickungssystem aufgetragenen Schicht immer höher ist, als durch den Anwender vorgegeben. Eine Kompensation durch die Maschinen-

steuerung ist jedoch möglich. Im Ordnungssystem für Gestaltabweichungen nach DIN 4760 (1982) kann der Effekt *Schrumpfung* den Formabweichungen zugeordnet werden.

#### 3.2.3 Schwindung (engl.: shrinkage)

Die Schwindung ist ein Maß für die geometrische Abweichung zwischen der Soll- und der Istoberfläche eines Werkstücks. Sie kann sich auf Längen, Flächen oder Volumen beziehen. Die Bestimmung des Schwindungswertes ist durch zwei verschiedenartige Gleichungen möglich. Gleichung (5) und Gleichung (6) verdeutlichen dies am Beispiel der Bestimmung der Schwindung für ein Längenmaß:

$$s_1 = \frac{l_{soll}}{l_{ist}} - 1 \quad (5)$$

$$s_2 = 1 - \frac{l_{ist}}{l_{soll}} \quad (6)$$

Unabhängig von der Berechnungsart handelt es sich um eine dimensionslose Größe, welche den Sollwert einer Länge  $l_{soll}$ , einer Fläche  $A_{soll}$  oder eines Volumens  $V_{soll}$  mit dem Istwert ( $l_{ist}$ ,  $A_{ist}$ ,  $V_{ist}$ ) ins Verhältnis setzt. Die Unterschiede zwischen beiden Gleichungen sind für kleine Schwindungswerte als gering zu bezeichnen. Abbildung 12 zeigt die Differenz von  $s_1$  zu  $s_2$  in einem Intervall von  $[-4\%, 4\%]$ .

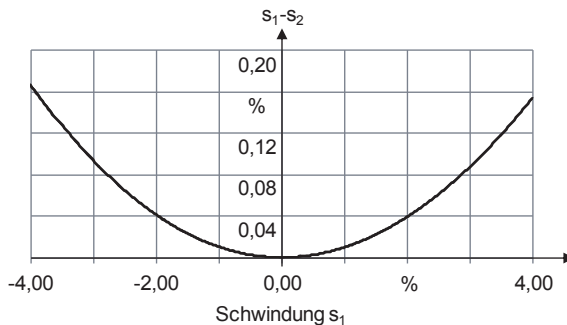


Abbildung 12: Unterschiede in der Schwindungsdefinition

Für die vorliegende Arbeit wird einheitlich die Schwindungsdefinition nach Gleichung (5) verwendet. Durch die mathematische Definition sind sowohl positive als auch negative Werte für die Schwindung möglich. Physikalisch bedeutet

### 3.2 Gestaltabweichungen additiv gefertigter Werkstücke

dies, dass bei positiven Werten von  $s$  eine Abnahme, bei negativen Werten von  $s$  eine Zunahme des Maßes stattfindet.

Wie vorstehend beschrieben, sind Abweichungen zwischen Sollmaß und Istmaß aus vielen Gründen möglich. Von besonderer Relevanz bei der Schwindung sind jedoch thermische Ausdehnungseffekte, welche sowohl direkt im additiven Fertigungsprozess als auch in einem nachgelagerten Prozessschritt auftreten können. Durch die Kenntnis des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  des verwendeten Ausgangsmaterials lässt sich der Effekt berechnen (KELLER 1999). Gleichung (7) verdeutlicht die durch thermische Effekte verursachte Längenänderung. Dabei bezeichnet  $l$  eine Länge,  $\Delta\theta$  eine Temperaturdifferenz (z. B. zwischen Prozesstemperatur und Anwendungstemperatur) sowie  $\Delta l$  die resultierende Längenänderung. Es gilt:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \quad (7)$$

Bei der messtechnischen Erfassung von Längen kann es vorkommen, dass die Schwindungseffekte von einer fehlerhaft kalibrierten Strahlkompensation (NÖKEN 1997; SAUER 2005) (engl. beam offset) überlagert werden (GERVASI 2007) (vgl. Abbildung 13). Dabei soll die Strahlkompensation den Fehler ausgleichen, der entstehen würde, wenn der Mittelpunkt der Verfestigungszone entlang der Kontur einer zu verfestigenden Fläche geführt werden würde (NÖKEN 1997). Die Kompensation erfolgt deshalb durch eine Verschiebung der Spur des Energieeintrags in das Innere einer zu verfestigenden Fläche. Der Wert der Verschiebung orientiert sich dabei am Durchmesser der Verfestigungszone durch den Energieeintrag.

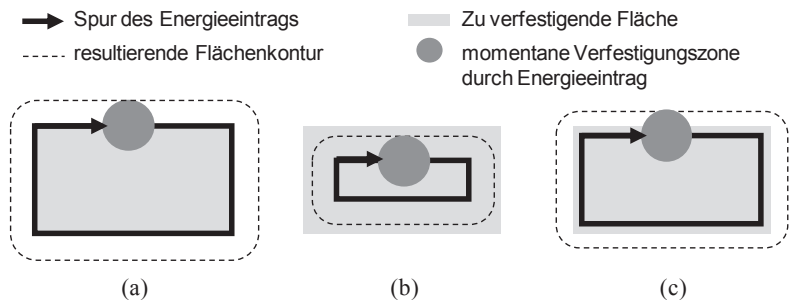


Abbildung 13: Arbeitsweise der Strahlkompensation, (a) unkompensiert, (b) überkompensiert, (c) unterkompensiert (in Anlehnung an NÖKEN (1997))

Durch eine fehlerhafte Einstellung des Wertes der Verschiebung kann es zu einer Über- bzw. Unterkompensation kommen. Eine Überkompensation verstärkt unbeabsichtigt den Schwindungseffekt, eine Unterkompensation reduziert diesen (WANG 1999).

Der Schwindungseffekt ist bei den einzelnen additiven Fertigungsverfahren unterschiedlich stark ausgeprägt. Während bei Strahlschmelzverfahren die Auswirkungen nahezu vernachlässigt werden können, muss der Schwindung beim Lasersintern eine hohe Relevanz beigemessen werden (PACURAR ET AL. 2009). Die aus der Schwindung resultierenden Formabweichungen haben unter den prozessrelevanten Effekten den größten Einfluss auf die Genauigkeit der produzierten Werkstücke (RAGHUNATH & PANDEY 2007; SENTHILKUMARAN ET AL. 2008). Zur Kompensation werden häufig materialabhängige Skalierungsfaktoren verwendet, deren Werte zuvor mit Hilfe von speziell gestalteten Probekörpern ermittelt wurden (BRAJLIH ET AL. 2006; DAO ET AL. 1999; MAHESH ET AL. 2004; PACURAR ET AL. 2009; PACURAR ET AL. 2010; SENTHILKUMARAN ET AL. 2009; SHEN ET AL. 2000; TANG ET AL. 2004; WANG 1999; ZHOU ET AL. 2000). Die Skalierungsfaktoren werden dabei oftmals in Übereinstimmung mit dem Achsensystem der Maschine bestimmt. Die Auswirkung einer an der Länge  $l$  wirkenden Schwindung  $s$  kann nach Gleichung (8) kompensiert werden:

$$l_{Komp} = l \cdot (1 + s) \quad (8)$$

Der Hauptzweck der Schwindungskompensation ist die Verringerung der durch die Schwindung hervorgerufenen Ungenauigkeiten, nicht jedoch die Eliminierung der ursächlichen Effekte (SENTHILKUMARAN ET AL. 2008). Wegen Inhomogenitäten im Bauraum einer Fertigungsmaschine kann es jedoch auch zu Schwindungen kommen, welche durch konstante Faktoren nicht mehr hinreichend genau angenähert werden können (MANETSBERGER ET AL. 2003; SHEN ET AL. 2000). Nach SENTHILKUMARAN ET AL. (2009) und DILLER ET AL. (2010) sind die für die Schwindung ursächlichen Temperaturgradienten im Bauraum einer Fertigungsmaschine als hoch anzusehen. Zudem ist davon auszugehen, dass verschieden gestaltete Werkstücke eine unterschiedliche Schwindungscharakteristik aufweisen (JACOBS 2000; MANETSBERGER ET AL. 2003). Abbildung 14 zeigt schematisch die zwischen zwei Positionen  $X_1$  und  $X_2$  wirkende Schwindung  $s$ , welche das Werkstück nach der z. B. durch Inhomogenitäten hervorgerufenen Schwindungsfunktion  $f(x)$  beeinflusst.

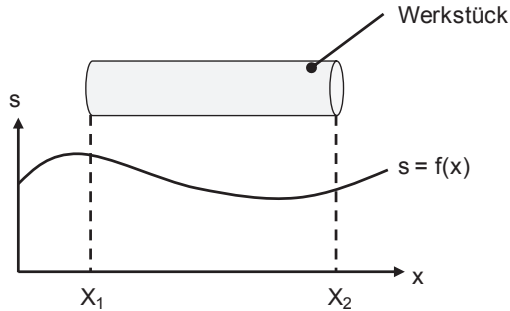


Abbildung 14: Schematischer Schwindungsverlauf an einem Werkstück

Gleichung (8) vernachlässigt die positionsabhängige Änderung der Schwindung und geht stattdessen von einem konstanten Wert aus. Die durch die Schwindungsfunktion  $s = f(x)$  resultierende Länge  $l_{Res}$  eines Werkstücks kann nach Gleichung (9) mithilfe der Integralrechnung bestimmt werden. Gleichung (9) basiert auf der Definition der Schwindung nach Gleichung (5) und unterteilt die Länge des Werkstücks  $X_2 - X_1$  in infinitesimale Abschnitte  $dx$ . Es gilt für die Länge:

$$l_{Res} = \int_{X_1}^{X_2} \frac{dx}{1 + f(x)} \quad (9)$$

Eine Auswertung von Gleichung (9) ist nur möglich, wenn die Schwindungsfunktion bekannt ist. Wurden die an dem Werkstück wirkenden bzw. im Baubereich herrschenden Schwindungen nur an einzelnen Positionen (Stützstellen) ermittelt, so muss zur Bestimmung der resultierenden Länge auf ein Näherungsverfahren zurückgegriffen werden (PAPULA 2001). Der unbekannte Verlauf zwischen den Stützstellen wird dabei z. B. durch Trapeze angenähert. Die Näherungslösung strebt mit zunehmender Anzahl der Stützstellen gegen die analytische Lösung.

#### 3.2.4 Verzug (engl.: warpage)

Der Begriff *Verzug* bezeichnet eine Formänderung eines Werkstücks, bei dem das Volumen nahezu konstant bleibt. Bedingt durch den schichtweisen Aufbau und das zeilenweise Belichten kann sich ein starker Temperaturgradient ausbilden, durch welchen bereits während der Fertigung Eigenspannungen induziert werden (COREMANS 1999). Diese führen zum Verzug einzelner Werkstückberei-

che, wofür auch der Fachausdruck *curling* verwendet wird (vgl. Abbildung 15) (ALSCHER 2000; RIETZEL ET AL. 2011; YANG ET AL. 2002).

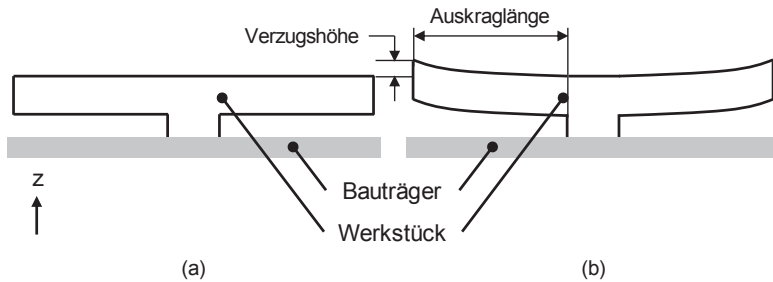


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Auswirkungen des Verzugs (in Anlehnung an COREMANS (1999)), (a) Werkstück ohne Verzug, (b) Werkstück mit Verzug

Abhängig vom Zeitpunkt des Lösens der Eigenspannungen kann der Baufortschritt gefährdet sein (ALSCHER 2000). NIINO & SATO (2009) unterscheiden deshalb zwischen den Typen *Verzug im Bauprozess* („curls in process“) und *Verzug bei Abkühlvorgängen* („curls in cooling“).

Während Schwindungseffekte in erster Näherung unabhängig von der Abkühlgeschwindigkeit auftreten, bewirkt ein schnelles Abkühlen eine starke Zunahme des Verzugs (SENTHILKUMARAN ET AL. 2009). Zur Quantifizierung wird oftmals der Curlfaktor  $C_f$  bestimmt, bei welchem die Verzugshöhe ins Verhältnis zur maximalen Auskraglänge gesetzt wird (CELI 1995). Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird, lässt sich der Curlfaktor nur bei einfachen Werkstücken bestimmen. Weist das Werkstück komplexe Freiformflächen auf, ist sowohl die Auskraglänge als auch die Verzugshöhe nicht einfach zu ermitteln. Für eine ganzheitliche Quantifizierung der Auswirkungen des Verzugs besteht aktuell noch Forschungsbedarf. Darüber hinaus ist auch die Identifizierung von Ursachen noch Gegenstand laufender Forschungsarbeiten. Bekannt ist jedoch, dass Verzugserscheinungen an Werkstücken immer auf anisotrope Schwindung zurückgeführt werden können (KELLER 1999). Es ist deshalb davon auszugehen, dass eine Reduzierung der Schwindung auch den Verzug mindert.

#### 3.2.5 Schichtüberhärtung (engl.: overcure)

Der Effekt *Schichtüberhärtung* tritt an Werkstückflächen auf, deren Normalenvektor eine Komponente enthält, welche entgegengesetzt zur Aufbau-

richtung zeigt. Bei der Schichtüberhärtung kommt es zu einer Verfestigung des Ausgangsmaterials im Bereich einer Schichtdicke, welche über dem nominellen Wert liegt (CELI 1995). Bei übereinanderliegenden Schichten wird der Effekt genutzt, um durch ein Aufschmelzen des darunterliegenden Bereichs eine hinreichende Haftung zwischen den einzelnen Schichten zu erreichen (SAUER 2005). Negative Auswirkungen können somit nur in Werkstückbereichen auftreten, welche nicht mit einer darunterliegenden Fläche verbunden sind.

#### 3.2.6 Rauheit (engl.: surface roughness)

Die Gestaltabweichung *Rauheit* wird nach der DIN 4760 (1982) der 3., 4. sowie der 5. Ordnung zugeteilt (vgl. Tabelle 3 auf Seite 28). Die 3. und die 4. Ordnung beziehen sich dabei auf die Rauheit, welche an einer technischen Oberfläche messtechnisch erfasst werden kann und z. B. durch Rillen, Riefen, Schuppen oder Kuppen hervorgerufen wird. Die 5. Ordnung bezieht sich dagegen auf den inneren Aufbau eines Werkstücks, welcher durch die Gefügestruktur dargestellt werden kann.

- Oberflächenrauheit

Die durch additive Verfahren realisierbare Oberflächenrauheit ist für technische Anwendungen oftmals zu hoch und für eine direkte Weiterverwendung nicht ausreichend (KROL ET AL. 2009). Sie wird während des Verfestigungsvorgangs durch Energieeinbringung in das lose Ausgangsmaterial hervorgerufen. Die Charakteristiken der Energieeinbringung (z. B. Kaustik des Laserstrahls) und des Ausgangsmaterials (z. B. Korngrößenfraktionierung) bestimmen die zu erreichende Oberflächenrauheit. SEHRT (2010) nennt für das Strahlschmelzen Pulveranhäufungen und Schmelzausläufer als Ursachen für die Rauheit, welche jedoch durch geeignete Strahlverfahren wieder egalisiert werden können. Ferner ist der Treppenstufeneffekt als eine Form von Rauheit anzusehen (KARAPATIS 2002; REHME & EMMELMANN 2005), welcher durch den schichtweisen Aufbau der Werkstücke hervorgerufen wird.

- Gefügestruktur

Das Gefüge ergibt sich aus der Umwandlung des losen Ausgangsmaterials in einen festen Körper durch Energieeintrag. Es kann durch Merkmale (z. B. Poren, Lunker) beschrieben und charakterisiert werden. Nach OVER (2003) kann es durch induzierte Eigenspannungen und die vorstehend beschriebene Oberflächenrauheit auch zu Rissbildungen im Gefüge kommen. Die Auswirkungen und die Relevanz dieser Merkmale für den jeweiligen Einsatzzweck des

Werkstücks müssen werkstückspezifisch bzw. anwendungsspezifisch ermittelt bzw. festgelegt werden.

## 3.3 Einflussfaktoren auf die Prozessfähigkeit additiver Fertigungsverfahren

### 3.3.1 Allgemeines

Der Begriff *Prozessfähigkeit* wurde bereits in Abschnitt 2.3.4 ab Seite 19 erläutert. Zusammenfassend kann wiedergegeben werden, dass die Prozessfähigkeit für wirtschaftlich relevante Fertigungsverfahren mit zwei zentralen Aspekten verknüpft ist. Fertigungsprozesse müssen demnach zum einen eine geforderte Fähigkeit aufweisen, zum anderen muss das Prozessergebnis einer Beherrschbarkeit unterliegen (vgl. Abbildung 9 auf Seite 21). *Prozessfähigkeit* beschreibt die Möglichkeit eines Prozesses, gewissen Anforderungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit von Merkmalen zu genügen. *Beherrschbar* hingegen ist ein Prozess, wenn er Merkmale innerhalb definierter Toleranzgrenzen zu erzeugen vermag.

Durch die Arbeiten von EISEN (2009), REHME (2010) und SEHRT (2010) existieren bereits detaillierte Ursache-Wirkungs-Diagramme, welche die Einflussgrößen auf die Werkstückqualität und die Wirtschaftlichkeit beim Strahlschmelzen darstellen. Ursache-Wirkungs-Diagramme (engl. cause-and-effect diagrams) stellen die Beziehungen zwischen dem Ergebnis eines Prozesses und den Größen dar, welche einen Einfluss auf dieses ausüben (ISHIKAWA 1990). Die Entscheidung über die Relevanz einer Eingangsgröße ist nicht immer eindeutig und obliegt dem Anwender der Methode. Auch ist ein bestehendes Ursache-Wirkungs-Diagramm nicht als eine abgeschlossene Einheit zu betrachten, da die Identifizierung bisher unbekannter Beziehungen eine Ergänzung erforderlich macht. Die Darstellungsart eignet sich sowohl für Zusammenhänge, welche nur prinzipiell bekannt sind, als auch für analytisch beschriebene Funktionen.

Aufbauend auf den Vorarbeiten soll nachfolgend eine qualitative Betrachtung der nach Abbildung 8 auf Seite 19 vorhandenen Einflussfaktoren *Mensch, Methode, Maschine, Material* und *Milieu* auf die Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung erfolgen.



### 3.3 Einflussfaktoren auf die Prozessfähigkeit additiver Fertigungsverfahren

#### 3.3.2 Einflussfaktor *Mensch*

Der Mensch übt durch seine Beteiligung an der gesamten Prozesskette einen starken Einfluss auf die Qualität und die Wirtschaftlichkeit additiv gefertigter Werkstücke aus (SEHRT 2010). Nach REINHART ET AL. (2011) ist die Leistungsfähigkeit eines Menschen jedoch nicht konstant, sondern unterliegt Schwankungen (z. B. im 24-Stunden-Rhythmus), welche es bei den zu verrichtenden Tätigkeiten zu berücksichtigen gilt. Definierte Handlungsfolgen eines Mitarbeiters basieren stets auf individuell verschiedenen Zielhierarchien und Handlungsschemata (SCHLICK ET AL. 2010). Die Kompetenz eines Mitarbeiters ist hierbei als zentraler Faktor anzusehen. Nach SCHLICK ET AL. (2010) sind Kompetenzen „verfügbare oder erlernbare Fähigkeiten und Fertigkeiten, die zur Lösung bestimmter Probleme eingesetzt werden. Darüber hinaus schließt der Begriff die motivationale, volitionalen (d. h. willentliche) und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten mit ein, um die erworbenen Fähigkeiten und Fertigkeiten verantwortungsvoll sowie erfolgreich auf andere Herausforderungen zu übertragen“.

Bei monotonen Tätigkeiten können sich Unterschiede im Vorgehen ergeben, welche auf eine physische Unterforderung des Mitarbeiters zurückgeführt werden können. Diese Unterschiede können sich auf das Prozessergebnis auswirken. Bei neuartigen Aufgaben dagegen wird ein Mitarbeiter stark gefordert und muss eine Lösung auf Basis des bereits vorhandenen Erfahrungswissens ableiten. Dabei führt Überforderung durch ein zu großes Informationsangebot oder durch eine zu geringe Verarbeitungsgeschwindigkeit zu Fehlern in der Verarbeitung (SCHLICK ET AL. 2010).

Aufgrund unterschiedlicher Kompetenzen sind Problemlösungsstrategien stark mitarbeiterbezogen. Insbesondere bei Fertigungen mit geringen Losgrößen und einer hohen Variantenvielfalt ist davon auszugehen, dass der Mensch durch seine Problemlösungskompetenz positive Effekte auf den Fertigungsprozess haben kann. Potenzielle negative Einflüsse des Menschen lassen sich z. B. durch vorgegebene Handlungsabläufe und Checklisten reduzieren. Eine vollständige Elimination ist dagegen nicht möglich.

Aufgrund der hohen Problemlösungskompetenz der Mitarbeiter in einer von einer hohen Variantenvielfalt geprägten Fertigung ist von einem positiven Einfluss auf den Aspekt *Beherrschbarkeit* auszugehen. Insbesondere durch die nicht konstante Leistungskurve der Mitarbeiter ist ein negativer Einfluss des Faktors *Mensch* auf den Aspekt *Fähigkeit* nicht auszuschließen, welcher jedoch durch die vorstehend genannten Maßnahmen reduziert werden kann.

### 3.3.3 Einflussfaktor *Methode*

Unter dem methodischen Einfluss beim Strahlschmelzen wird nach EISEN (2009) und SEHRT (2010) der für die additive Fertigung von Werkstücken verwendete Parametersatz verstanden. Nach SEHRT (2010) setzt sich dieser u. a. aus Parametern zur Steuerung der selektiven Verfestigung und zur schichtweisen Bereitstellung des Ausgangsmaterials zusammen. Die Variation des Parametersatzes ermöglicht einen hohen Grad an Spezialisierung. Dies ist im Besonderen bei der Qualifizierung der Technologie für neue Anwendungsfelder vorteilhaft. Für die Serienfertigung sind jedoch standardisierte Prozessparameter notwendig, da für diese eine Qualifizierung bereits stattgefunden hat und die erzielbaren Werkstückeigenschaften ermittelt wurden (EOS 2011).

Zur Erreichung einer hohen Prozessfähigkeit ist es deshalb zweckmäßig, standardisierte Parametersätze zu verwenden. Der Aspekt *Beherrschbarkeit* kann durch die werkstückspezifische und anwendungsspezifische Auswahl standardisierter Parametersätze berücksichtigt werden.

### 3.3.4 Einflussfaktor *Maschine*

Die Maschine übt als formgebendes Element des Werkstücks (GEBHARDT 2007) zwangsläufig einen hohen Einfluss auf die Qualität und die Kontinuität der Ergebnisse aus. Ein additives Fertigungssystem kann in verschiedene Komponenten untergliedert werden (wie in Abschnitt 2.2.2 ab Seite 8 beschrieben). Wie jedes technische System unterliegen auch diese Komponenten Alterungs- und Verschleißeffekten, welche das Verhalten der Komponenten verändern können. So nimmt beispielsweise die von Lasern emittierte Strahlungsleistung bei konstanter Ansteuerung mit zunehmender Betriebszeit ab (REISCH 2007). CELI (1995) konnte für die emittierte Laserleistung und den Strahldurchmesser bei der Stereolithografie eine örtliche Abhängigkeit feststellen. Ähnliche Effekte konnten auch von COREMANS (1999) und SKRYNECKI (2010) für das Strahlschmelzen nachgewiesen werden. Nach DREHER (2005) kann davon ausgegangen werden, dass sich unterschiedliche Laserleistungen beim Lasersintern negativ auf das Werkstück auswirken und dies eine anlagenunabhängige Prozessplanung erschwert.

Eine Aufgabe der Systementwicklung ist es, durch einen Instandhaltungsplan die Auswirkungen der Alterungs- und Verschleißeffekte auf die Werkstücke zu minimieren sowie durch geeignete Maßnahmen den Fertigungsprozess robust gegenüber Toleranzen und Veränderungen der Anlagenkomponenten auszugleichen. Aufgrund von Alterungs- und Verschleißeffekten ist mit zunehmender Betriebs-

### **3.3 Einflussfaktoren auf die Prozessfähigkeit additiver Fertigungsverfahren**

zeit von einer Reduzierung der Prozessfähigkeit auszugehen, welche jedoch durch Maßnahmen der Instandhaltung verzögert werden kann.

Der Nachweis zur Beherrschbarkeit des Fertigungsprozesses durch die Maschine ist Aufgabe des Maschinenherstellers und beispielsweise durch eine im Abschnitt 2.3.4 ab Seite 19 beschriebene kurzfristige Prozessfähigkeitsuntersuchung zu erbringen.

#### **3.3.5 Einflussfaktor *Material***

Die Materialeigenschaften bestimmen „maßgeblich den Schichtauftrag und sind Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Belichtung durch optimale Absorption der Laserstrahlung“ (SEHRT 2010). Für eine hohe Fähigkeit des Prozesses sind gleichbleibende Materialeigenschaften notwendig. Durch Wechselwirkungen des Materials mit der Umwelt und dem Prozess sowie durch Lagerungs- und Handhabungsvorgänge können sich Eigenschaften wie der Feuchtigkeitsgehalt, die Verschmutzung, die Fraktionierung oder die chemische Zusammensetzung verändern und somit auch Auswirkungen auf die Fähigkeit des Prozesses nehmen. Ohne regelmäßige Kontrollen des Materials ist eine Beurteilung bezüglich der Eignung für den Prozess nur eingeschränkt möglich. Die Beherrschbarkeit des Prozesses kann durch die Verwendung standardisierter Materialien und durch Konditionierung erreicht werden.

#### **3.3.6 Einflussfaktor *Milieu***

Das Milieu kann unterschieden werden in das Milieu innerhalb der Prozesskammer (Prozessumgebung) sowie das Milieu, in welchem das Fertigungssystem steht (Maschinenumgebung). Nach SEHRT (2010) ist für die Prozessumgebung die Bereitstellung von Inertgas mit geeigneten Eigenschaften für eine hohe Werkstückqualität relevant. Die Maschinenumgebung wird in den bestehenden Ursache-Wirkungs-Diagrammen nicht näher spezifiziert. Auswirkungen variierender Umgebungsbedingungen wie Sonneneinstrahlung, Temperatur und Luftfeuchte sowie eine Schwingungsanregung durch benachbarte Systeme auf die Fähigkeit und die Beherrschbarkeit des Fertigungsprozesses können nicht ausgeschlossen werden.

## 3.4 Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

### 3.4.1 Allgemeines

Das Ziel vieler Forschungsarbeiten ist die Prozessoptimierung. Unter dem Begriff *Prozessoptimierung* wird dabei die „Verbesserung eines Prozesses zum bestmöglichen Ergebnis hin verstanden“, bei welcher einzelne Schritte bzw. die gesamte Prozesskette mit den Eingangs-, Ausgangs- und Einflussgrößen optimiert werden soll bzw. sollen (EISEN 2009). Die Zielgrößen und die Randbedingungen der Prozessoptimierung sind dabei kontextabhängig zu wählen bzw. zu definieren.

Das bestmögliche Ergebnis impliziert meist eine hohe Prozessfähigkeit. Nachfolgend werden deshalb die Maßnahmen erläutert, welche zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung vielfach Anwendung finden. Dies sind:

- Empirische Prozessentwicklung
- Numerische Simulation
- Geometriebasierte Optimierung
- Fertigungsgerechtes Gestaltungsprinzip
- Standardisierung und Normierung
- Zweckmäßige Lerntätigkeiten
- Technologische Weiterentwicklungen
- Hybride Ansätze

### 3.4.2 Empirische Prozessentwicklung

Die empirische Prozessentwicklung hat zum Ziel, einen Sachverhalt durch gezielte Experimente oder Beobachtungen zu erforschen. Vorwiegend soll das Prozessverständnis gesteigert werden, indem Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Ausgangsgrößen identifiziert, bestätigt oder widerlegt werden. Hierfür werden Versuche geplant, durchgeführt und nachfolgend ausgewertet. Durch die Nutzung geeigneter Werkzeuge wie der Versuchsplanung (engl. Design of Experiments, DoE) kann der Aufwand bei der Durchführung und Auswertung der Experimente erheblich reduziert werden (KLEIN 2007). Die empirische Prozessentwicklung kann genutzt werden, um für den zu untersuchenden Prozess ein für weiterführende Aktionen (z. B. Simulation) nutzbares

### 3.4 Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

Modell zu entwickeln. Zudem können die Versuche so geplant werden, dass eine Zielgröße optimiert wird oder der Prozess um weitere Funktionen erweitert wird.

HAUSER ET AL. (2003) und AKHTAR ET AL. (2003) nutzten die empirische Prozessentwicklung zur Qualifizierung eines Schnellarbeitsstahls sowie eines Werkzeugstahls für das Strahlschmelzen. Es wurde dabei ein Versuchsplan entwickelt, bei welchem Prozessparameter (Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke, Spurbstand) und Werkstoffparameter (Kornfraktionierung, Fließfähigkeit) variiert wurden. Abgeleitet von den Ergebnissen der Einzelversuche konnte ein Prozessfenster identifiziert werden, aus welchem die zur Verarbeitung geeigneten Prozessparameter extrahiert werden können. Das angewendete Vorgehen ist als typisch für die Qualifizierung eines bis dahin nicht prozessierbaren Werkstoffs sowie zur Verbesserung ausgewählter Werkstoffeigenschaften zu bezeichnen. Vergleichbare Ansätze für unterschiedliche Materialien und Prozesse wurden auch in MEINERS (1999), ALSCHER (2000), OVER (2003), KRUTH ET AL. (2008a) und KEMPEN ET AL. (2011) angewandt.

Das Ziel von KÜSTERS ET AL. (2011) war die Ermöglichung eines robusten Strahlschmelzprozesses durch die Verwendung einer methodischen Parameterfindung. Unter *robust* wurde in diesem Zusammenhang verstanden, dass sich technisch unvermeidbare Schwankungen der Stellgrößen möglichst gering auf die Werkstückqualität auswirken. In der Arbeit wurden gezielte Parametervariationen experimentell untersucht und die Robustheit des Prozesses gegenüber diesen Veränderungen ermittelt.

Ebenfalls zur Erhöhung der Robustheit gegenüber Abweichungen von der Maßhaltigkeit verwendete ZHOU ET AL. (2000) die Versuchsmethode nach Taguchi. Durch die Wahl einer geeigneten Versuchsstrategie konnten die fünf Haupteinflussgrößen auf die Maßhaltigkeit bei der Stereolithografie mit einer praktikablen Anzahl an Einzelexperimenten identifiziert werden. Ähnliche Ansätze unter Nutzung der Versuchsmethode nach Taguchi wurden von ONUH & HON (2001), YANG ET AL. (2002) und RAGHUNATH & PANDEY (2007) durchgeführt.

Die empirische Prozessentwicklung stellt ein grundlegendes Werkzeug dar, um bestehende Prozesse zu optimieren sowie Prozesse für neue Anwendungen zu qualifizieren. Durch die Auswertung geeignet geplanter Versuchsreihen können effizient neue Erkenntnisse gewonnen werden, wodurch die Prozessfähigkeit gesteigert werden kann.

### 3.4.3 Numerische Simulation

Bei numerischen Simulationen werden die hohen Rechenleistungen von Computern zur Lösung komplexer, mathematisch beschriebener Probleme genutzt. Sie werden dann eingesetzt, wenn die Lösungsfindung, bedingt durch den Komplexitätsgrad des Problems, auf andere Weise praktisch nicht mehr möglich ist. Das zugrunde liegende mathematische Modell besteht häufig aus einem Differentialgleichungssystem, dessen Lösung mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) bestimmt wird. Ausgehend von einem realen, zu untersuchenden Prozess bzw. Werkstück wird dieser bzw. dieses in ein Modell überführt, welches aus einer endlichen Anzahl von Elementen besteht. Die Anzahl der Elemente hat dabei maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Lösung. In der Praxis muss zwischen der Rechendauer und dem Detaillierungsgrad des Modells und damit der Genauigkeit der Ergebnisse abgewogen werden.

BRANNER (2011) und ZÄH & BRANNER (2008) entwickelten ein modulares Simulationssystem für die thermische und thermomechanische Simulation von metallischen Schichtbauverfahren. Es ist hierdurch möglich, den Einfluss unterschiedlicher Fertigungsparameter auf die induzierten Eigenspannungen und Verformungen eines ausgewählten Werkstücks simulationsgestützt zu untersuchen. ZAEH ET AL. (2010) bauten auf diesem Simulationssystem auf und führten eine Sensitivitätsanalyse durch, um eine Aussage bezüglich optimierter Fertigungsparameter (Vorheiztemperatur, Orientierung des Werkstücks, Gestaltung der Stützstrukturen) für das Strahlschmelzen abgeben zu können. Auch MA & BIN (2007), NIEBLING (2005) und STEINBERGER ET AL. (2000) nutzten weitere Simulationsmodelle zur Berechnung der Temperatur- und der Spannungsfelder, welche beim Strahlschmelzen bzw. beim Lasersintern induziert werden. Darauf basierend wurden die für die untersuchten Referenzkörper optimierten Scanstrategien ausgewählt. Das von ZHANG & CHOU (1996) entwickelte Modell für das Fused Layer Modeling kann dazu genutzt werden, die Eigenspannungen im Werkstück vorherzusagen. Im Vordergrund stand hierbei die Untersuchung der Auswirkungen von Parametervariationen auf die Eigenspannungen im Werkstück. PACURAR ET AL. (2010) ermittelte mit der FEM die Schwindung bei Werkstücken, welche einen dem Aufbauprozess nachgelagerten Ofenprozess durchlaufen. Auch KOLOSISOV ET AL. (2004) und SINGH & PRAKASH (2010) nutzten die FEM zur Simulation der Temperaturverteilung im Bauraum einer Maschine. Das Ziel von SINGH & PRAKASH (2010) war dabei die Vorhersage der resultierenden Dichte der Werkstücke.

### 3.4 Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass numerische Simulationen geeignet sind, um Fertigungsparameter vorab zu bestimmen, ein anwenderspezifisches Optimierungskriterium (z. B. minimaler Verzug, maximale Werkstückdichte) zu erfüllen und dadurch die Prozessfähigkeit zu erhöhen. Einschränkungen ergeben sich hinsichtlich der nur näherungsweise bestimmten Randbedingungen, den Unzulänglichkeiten des Simulationsmodells sowie der resultierenden Rechen-dauer.

#### 3.4.4 Geometriebasierte Optimierung

Wie in Abschnitt 2.2.3 ab Seite 11 beschrieben, sind die additiven Fertigungsverfahren dadurch charakterisiert, dass der Aufbauprozess vollständig durch die digitalen Werkstückdaten vorgegeben wird. Es bietet sich insofern die Möglichkeit, die durch den Prozess hervorgerufenen Werkstückdefizite durch eine gezielte Deformation des digitalen Modells vorab zu berücksichtigen. Die im Aufbauprozess induzierten Gestaltabweichungen (vgl. Abschnitt 3.1) sollen so in ihren Auswirkungen reduziert und es soll dadurch eine Erhöhung der Prozessfähigkeit erreicht werden (vgl. Abbildung 16).

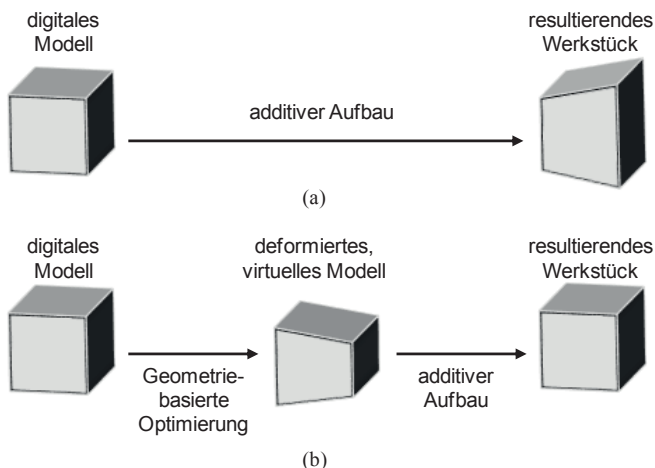


Abbildung 16: Prinzip der geometriebasierten Optimierung, (a) üblicher Aufbauprozess, (b) mit Vordeformation (in Anlehnung an STOPP ET AL. (2008))

Unter der Annahme einer gleichmäßigen Schwindung können die Abweichungen durch eine Beaufschlagung der digitalen Werkstückdaten mit einem Kompensationsfaktor reduziert werden (ALSCHER 2000; TANG ET AL. 2004). Nach NIEBLING (2005) sind die geometriebasierten Optimierungsansätze jedoch nur für eine bestimmte Werkstückgeometrie gültig und können nicht verallgemeinert werden. Dies ist in einem allgemein noch geringen Prozessverständnis begründet. Im Falle des Lasersinterns können z. B. die Temperatur- und die Spannungsfelder noch nicht hinreichend genau abgebildet werden (NIEBLING 2005). Trotz der mit einer Modellierung zwangsläufig vorhandenen Unzulänglichkeiten wurde durch SHEN ET AL. (2000) und MANETSBERGER ET AL. (2003) gezeigt, dass durch die Simulation des Wärmehaushaltes eine Basis für die Kompensation der Schwindung gelegt werden kann. SETHILKUMARAN ET AL. (2009) verwendeten zur Kompensation der Schwindung beim Lasersintern ein zweistufiges Vorgehen. In der ersten Stufe wurden die digitalen Werkstückdaten mit einem vom Maschinenhersteller vorgegebenen konstanten Skalierungsfaktor beaufschlagt. In der zweiten Stufe wurde, basierend auf den Schichtdaten, die durch die Länge einer einzelnen Scanlinie induzierte Schwindung diesem Skalierungsfaktor hinzugefügt. SETHILKUMARAN ET AL. (2009) erreichten dadurch eine deutliche Erhöhung der Prozessfähigkeit. TONG ET AL. (2003), TONG ET AL. (2004) und TONG ET AL. (2008) bestimmten die Charakteristik einer Fertigungsmaschine und prägten dieses Verhalten sowohl werkstück- als auch schichtbasiert in den Werkstückdaten auf. Durch die Kompensation konnten an aufrecht stehenden Zylindern unterschiedlicher Höhe Reduktionen der auftretenden Gestaltabweichungen erzielt werden. Auch STOPP ET AL. (2008) demonstrierten, wie durch die Berücksichtigung der durch die Fertigungsmaschine hervorgerufenen Gestaltabweichungen die erreichbare Maßhaltigkeit der Werkstücke gesteigert werden kann. MOESEN ET AL. (2011) zeigten, dass nicht nur die Auswirkungen von Schwindungseffekten durch eine geometriebasierte Optimierung reduziert werden können, sondern sie ermöglichten durch eine Anpassung der Scanstrategie auch den Aufbau von sehr dünnwandigen und filigranen Werkstückmerkmalen.

Obwohl keine uneingeschränkte Übertragbarkeit der vorstehend beschriebenen Ansätze auf beliebige, additive Verfahren oder Werkstücke möglich ist, sind die Auswirkungen einer geometriebasierten Optimierung auf die Prozessfähigkeit durchweg positiv. Die geometriebasierten Optimierungsansätze eliminieren nicht die Ursachen für Abweichungen, sondern reduzieren lediglich deren Auswirkungen. Einsatzmöglichkeiten ergeben sich für alle Defizite, welche eine Formabweichung nach DIN 4760 (1982) hervorrufen.



#### 3.4.5 Fertigungsgerechtes Gestaltungsprinzip

Das fertigungsgerechte Gestaltungsprinzip gehört zu der Gruppe der Gestaltungsrichtlinien. Im internationalen Umfeld werden Gestaltungsrichtlinien mit Design for X bezeichnet (PAHL 2005), wobei X den während der Konstruktion besonders zu beachtenden Aspekt repräsentiert. Ziel dieser Richtlinien ist es, unter Beachtung der verschiedenen Fertigungsverfahren und der jeweils einzelnen Verfahrensschritte eine Verringerung des Aufwandes in der Fertigung und eine Verbesserung der Qualität des Werkstückes zu erreichen (COLANI ET AL. 2011). Dabei helfen die Gestaltungsrichtlinien, dem zu beachtenden Aspekt gerecht zu werden und unterstützen die Grundregeln der Konstruktion im Besonderen (PAHL 2005). Während, im Gegensatz zu konventionellen Verfahren, der Aufwand in der additiven Fertigung nahezu unabhängig von der Komplexität des Werkstückes ist (ZÄH 2006), kann eine fertigungsgerechte Gestaltung dennoch zu einer Erhöhung der Werkstückqualität beitragen. Trotz der hohen Konstruktionsfreiheit weisen auch additive Fertigungsverfahren Restriktionen auf, deren Missachtung zu einer verminderten Werkstückqualität führen kann. Durch die Berücksichtigung der technologischen Randbedingungen bereits in der Konstruktionsphase können die resultierenden Gestaltabweichungen reduziert werden. Der Sinn der Richtlinien zur fertigungsgerechten Gestaltung für die additive Fertigung liegt in der Formulierung und Publikation der Grenzen und Möglichkeiten, um auch zunächst fachfremden Konstrukteuren die erfolgreiche Nutzung der additiven Verfahren zu ermöglichen.

TRENKE (2000) formulierte beispielsweise Konstruktionsregeln, um durch Strahlschmelzen gefertigte Werkzeugformensätze und Prototypen geeignet zu gestalten. Es wurden hierbei Empfehlungen hinsichtlich der Abmessungen der zu fertigenden Werkstücke, der Orientierung von Bohrungen sowie der minimal möglichen Abmessungen von Strukturen vermittelt. Zudem wurden für ein bronzebasiertes Material (Herstellerbezeichnung DirectMetal 50-V2) Hinweise zur Gestaltung besonderer Geometriemerkmale wie Nuten, Entformungsschrägen, Rippen, Stifte sowie Anguss- und Kühlkanäle gegeben. Um die Nutzung der Konstruktionsregeln zu vereinfachen, wurden die Empfehlungen abschließend in Form einer Checkliste zusammengefasst. Neben dem Strahlschmelzen sind auch für das Lasersintern Gestaltungsrichtlinien verfügbar. SIPPEL (2010) ermittelte unter Verwendung eines Lasersintersystems EOS P 390 geeignete Gestaltungsgrößen (Schriftgröße, Extrusionstiefe, Extrusionsrichtung) zur Herstellung von Beschriftungen. Ferner wurden Aussagen bezüglich der zu fertigenden Wanddicken, des Durchmessers von Stiften, der Breite von Fugen sowie des Durchmessers von

Löchern getätigt. Ähnliche Untersuchungen für das Lasersintern wurden von WEGNER & WITT (2010) durchgeführt. Ergänzend wurden hierbei die für die Realisierung von funktionsintegrierten Komponenten notwendigen Spaltmaße ermittelt und Empfehlungen zur Konstruktion von Stangenscharnieren, Filmscharnieren, Federn und Schnapphaken formuliert. Basierend auf einer Umfrage unter Anwendern, Herstellern, Dienstleistern sowie Forschungseinrichtungen konnten WITT & WEGNER (2010) einen Probekörper entwerfen, durch welchen Konstruktionsempfehlungen für die Verfahren Lasersintern, Strahlschmelzen, Multi-Jet Modeling, Stereolithografie und 3D-Drucken abgeleitet werden konnten. Da die entwickelte Konstruktionsrichtlinie einen „allgemeingültigen Charakter“ (WITT & WEGNER 2010) aufweist, wird das Potenzial einzelner Maschinen nicht vollständig wiedergegeben. Neben der reinen Formulierung von Gestaltungsrichtlinien wurde von WITT ET AL. (2010) ein wissensbasiertes Unterstützungssystem entwickelt, welches den Konstrukteur durch den Gestaltungsprozess führt und beispielsweise Hilfestellungen bei der Auslegung der Stützstrukturen bietet.

#### 3.4.6 Standardisierung und Normierung

In einer Informationsgesellschaft hat das verfügbare Wissen einen starken Einfluss auf die Produktivität und somit auch auf das Wachstum der Wirtschaft (DIN 2000; ISO 2011). Nach DIN (2000) üben Normen durch die Verteilung des Wissens um neue Forschungs- und Entwicklungslösungen einen positiven Einfluss sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht aus. Technische Normen sind aus einem offiziellen Normungsverfahren hervorgegangene Regelungen zur Vereinheitlichung eines Sachverhalts. Dadurch grenzen sie sich von Standards ab, welche von jeder Organisation (z. B. Verband, einzelnes Unternehmen) herausgegeben werden können. Geeignete Standards und Normen können sowohl gemeinsame Methoden zur Bestimmung der Möglichkeiten und Grenzen der additiven Verfahren bereitstellen als auch den Übergang zu einer verstärkten kommerziellen Nutzung der Technologie unterstützen (JURRENS 1999). Auf einer organisatorischen Ebene können dadurch die Sicherheit der Komponenten und Prozesse gewährleistet und eine Verbesserung der Kompatibilität zwischen verschiedenen Systemen erzielt werden (JURRENS 1999).

Eine Voraussetzung zur breiten Nutzung der Technologie ist die Festlegung einer einheitlichen Nomenklatur. In ASTM F2792 (2010) wurden hierfür Beschreibungen und Akronyme für die additiven Fertigungsverfahren für unterschiedliche Zielgruppen definiert. In VDI 3404 (2009) wurden diese Beschreibungen und

### 3.4 Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

Akronyme zusätzlich noch um Verfahrensgrundlagen, Qualitätskenngrößen und Liefervereinbarungen ergänzt. Der Normungsprozess in der additiven Fertigung ist als noch nicht abgeschlossen zu betrachten, da beide Richtlinien in eine internationale Norm überführt werden sollen (DIN 2011). Als ein Industriestandard in der additiven Fertigung gilt das Dateiformat STL (vgl. Abschnitt 2.2.3.2 auf Seite 12) (FADEL & KIRSCHMAN 1996). Bedingt durch die beschriebenen Defizite des Formats sowie eine mangelnde Berücksichtigung der stark erweiterten Möglichkeiten in der additiven Fertigung (z. B. Multimaterialverarbeitung, Herstellung gradiertter Werkstoffeigenschaften) wurde das Nachfolgeformat Additive Manufacturing File (AMF) bzw. STL 2.0 entwickelt (ASTM 2011), welches zukünftig in eine Norm überführt werden soll.

Neben den beschriebenen positiven, wirtschaftlichen Nutzeffekten bewirken Standards und Normen indirekt auch technische Vorteile durch die Vereinheitlichung von Verfahrensgrundlagen und durch die Definition von Qualitätskenngrößen und Liefervereinbarungen. Der Nutzen ist dabei nicht auf einzelne Unternehmen beschränkt, sondern erstreckt sich auf die gesamte Branche.

#### 3.4.7 Zweckmäßige Lerntätigkeiten

Nach der KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2000) sind bezüglich zweckmäßiger Lerntätigkeiten drei grundlegende Kategorien zu unterscheiden:

- **Formales Lernen**  
Das formale Lernen findet in Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen statt. Das Ziel ist die Erreichung von anerkannten Abschlüssen und Qualifikationen.
- **Nicht-formales Lernen**  
Das nicht-formale Lernen findet außerhalb der Hauptsysteme der allgemeinen und beruflichen Bildung statt und ist nicht zwingend mit dem Erreichen von formalen Abschlüssen verbunden. Nicht-formales Lernen kann z. B. am Arbeitsplatz oder bei Organisationen und Gruppierungen der Zivilgesellschaft stattfinden.
- **Informelles Lernen**  
Das informelle Lernen ist eine Begleiterscheinung des täglichen Lebens. Es handelt sich dabei nicht zwingend um intentionales, d. h. zielgerichtetes Ler-

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

---

nen, weshalb die Lernenden die Erweiterung des Wissens unter Umständen nicht explizit wahrnehmen.

Nach SEHRT (2010) übt der Bediener durch seine Teilnahme an der gesamten Prozesskette zur additiven Fertigung und durch den regelnden Eingriff in den Fertigungsprozess einen großen Einfluss auf die Werkstückqualität und die Wirtschaftlichkeit aus. Eine Unterstützung des Bedieners durch geeignete Lernangebote im Bereich der additiven Fertigung dient somit zur Erhöhung und Beibehaltung einer hohen Prozessfähigkeit.

Bedingt durch den hohen Innovationscharakter der Technologie ist auch die Entwicklung der Breite der Lernangebote als noch nicht abgeschlossen zu betrachten. Der weitere Ausbau und die Konzeption neuer Angebote ist ein Ziel des Arbeitskreises *Bildung* innerhalb der sog. RM-Plattform Deutschland (EMMELMANN 2012). Im Bereich des formalen Lernens sind zunehmend Lernangebote universitärer und außeruniversitärer Einrichtungen in Form von Vorlesungen und Praktika zu verzeichnen. Im Bereich des nicht-formalen Lernens führt die Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) Ausbildungen zur sog. Rapid-Manufacturing-Fachkraft Metall beziehungsweise Rapid-Manufacturing-Fachkraft Kunststoff durch (LZN 2012). Zudem können eine Vielzahl an Schulungen, Messen, Seminaren und Konferenzen gezählt werden, welche sich mit speziellen Themen der additiven Fertigung beschäftigen. Bedingt durch den Begleitcharakter des informellen Lernens, können in dieser Kategorie keine spezifischen Lehr- oder Lernaktivitäten verzeichnet werden, obgleich diese implizit vorhanden sind.

#### 3.4.8 Technologische Weiterentwicklungen

Zur Erreichung nachhaltigen Wirtschaftswachstums sind Investitionen in den Bereichen Forschung und Entwicklung (FuE) notwendig. So werden FuE-Aktivitäten auf makroökonomischer Ebene „zunehmend als eigenständige gesamtwirtschaftliche Wachstumsfaktoren wahrgenommen“ (IWH 2011). Erfolgreiche FuE-Ergebnisse, welche in eine Produkt- oder Prozessinnovation überführt werden können, leisten dabei einen hohen Umsatzbeitrag für die Unternehmen (BMBF 2011).

Technologische Weiterentwicklungen finden oftmals in enger Kooperation von Wissenschaft und Wirtschaft statt. So konnte das von KRUTH ET AL. (2008b) und CRAEGHS ET AL. (2011) entwickelte System zur Schmelzbadüberwachung kommerzialisiert werden (BERUMEN ET AL. 2012). Mit dem System kann u. a. die

Stabilität eines vom Laser erzeugten Schmelzbades überwacht werden. Gleichzeitig kann das System verwendet werden, um eine Prozessdokumentation anzufertigen und dadurch die Fähigkeit des Strahlschmelzprozesses nachzuweisen. Das sog. *ganzheitliche Qualitätsmanagement* der Firma EOS GmbH Electro Optical Systems wurde ebenfalls für das Strahlschmelzen entwickelt (SHELLABEAR 2011). Durch die Überwachung und Dokumentation qualitätsrelevanter Faktoren entlang der gesamten Prozesskette wird die Sicherstellung der Qualitätsanforderungen und die „Erreichung des bestmöglichen Qualitätsniveaus“ angestrebt (SHELLABEAR 2011). GROTH ET AL. (2010) und BUCHBINDER ET AL. (2011) konnten nachweisen, dass beim Strahlschmelzprozess durch eine geeignete Temperierung eine Reduktion der induzierten Eigenspannungen erzielt werden kann. Die prototypische Umsetzung und Validierung wurde in SCHWARZE (2011) vorgestellt. Eine Erhöhung der Prozessfähigkeit beim Lasersintern soll durch die im Schutzrecht EP 1762122B1 Patent (2008) beschriebene Strahlungsheizung ermöglicht werden, welche konstruktionsbedingt eine weitgehend gleichmäßige Wärmeabstrahlung in das Pulverbett aufweist. Durch eine homogene Wärmeverteilung in der Prozesskammer sollen Temperaturgradienten reduziert und dadurch Schwindung und Verzug minimiert werden.

### 3.4.9 Hybride Ansätze

Hybride Optimierungsansätze stellen eine Mischform der vorstehend beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit dar. Durch die Kombination verschiedener Ansätze können die Vorteile der jeweiligen Maßnahmen gezielt genutzt werden und dadurch synergetische Effekte auftreten. Zudem können durch die ergänzende Nutzung die Unzulänglichkeiten einzelner Ansätze abgebaut bzw. in ihren Auswirkungen reduziert werden. In der Praxis werden meist Kombinationen der einzelnen Maßnahmen angewendet, um eine Erhöhung der Prozessfähigkeit zu erreichen.

## 3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden einführend die derzeitigen Defizite additiv gefertigter Werkstücke beleuchtet. Die Angabe erfolgte dabei als Darstellung in Form von Gestaltabweichungen, welche auch für konventionelle Verfahren Verwendung findet. Ferner wurden die Faktoren diskutiert, welche einen Einfluss auf die Prozessfähigkeit ausüben. Aufbauend auf vorhandenen Ursache-Wirkungs-Diagrammen wurden dabei die Bereiche *Mensch, Methode, Maschine, Material*

### **3 Stand der Wissenschaft und Technik**

---

und *Milieu* analysiert. Abschließend wurden aktuelle Arbeiten aus Wissenschaft und Technik erläutert, durch welche eine Weiterentwicklung der additiven Fertigungsverfahren erreicht werden soll. Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Ansätze erkennbar ist. Das Spektrum umfasst sowohl Maßnahmen zur direkten Anpassung der am Prozess beteiligten Peripherie als auch die Einführung von organisatorischen Maßnahmen oder Regulierungen zur Standardisierung von Begrifflichkeiten und Tätigkeiten. Im nachfolgenden Kapitel wird der aus den Grundlagen und dem derzeitigen Stand der Wissenschaft und der Technik resultierende Handlungsbedarf formuliert.

## 4 Identifikation des Handlungsbedarfs

### 4.1 Allgemeines

Die in Abschnitt 3.3 ab Seite 36 beschriebenen Ursache-Wirkungs-Diagramme (EISEN 2009; REHME 2010; SEHRT 2010) zur Abbildung der Wirtschaftlichkeit sowie der Qualität mittels Strahlschmelzen gefertigter Werkstücke erlauben einen detaillierten Einblick in die globalen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge des Verfahrens. Unter *global* ist in diesem Kontext eine verallgemeinerte und abstrahierte Darstellung zu verstehen, welche besondere Randbedingungen und Einflüsse auf die Prozesskette, den Prozess oder das Fertigungssystem weitgehend vernachlässigt. Unter *besonderen Randbedingungen und Einflüssen* werden wiederum Eigenschaften verstanden, welche z. B. nur bei einem Fertigungssystem auftreten und dieses dadurch von anderen Fertigungssystemen unterscheiden. Auch die in Abschnitt 3.4 ab Seite 40 beschriebenen Ansätze zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung gehen meist von einer grundsätzlichen Unabhängigkeit bezüglich des verwendeten Fertigungssystems aus. Soweit Abhängigkeiten erkannt werden, z. B. eine Positionsabhängigkeit der Laserleistung (COREMANS 1999; SKRYNECKI 2010), werden diese für die fokussierte Zielsetzung als vernachlässigbar und nicht relevant bewertet.

Die globale Betrachtung ist im Sinne einer ganzheitlichen Weiterentwicklung der Technologie als sinnvoll anzusehen und hat dazu geführt, dass innerhalb von ca. zwei Jahrzehnten die Technologie eine industrielle Reife erlangt hat. Vergleichbar mit dem Paretoprinzip ist eine weitere Optimierung mit einem überproportional hohen Aufwand verbunden. Für Anwendungsbereiche, welche sowohl hohe Anforderungen an die Qualität stellen als auch eine einwandfreie Reproduzierbarkeit der Ergebnisse fordern, ist eine Berücksichtigung des besonderen Verhaltens der am Prozess beteiligten Komponenten zweckmäßig. Untersuchungen (vgl. Abschnitt 3.3.4 ab Seite 38) haben aufgezeigt, dass eine vollständige Homogenität der Prozessbedingungen innerhalb des Bauraumes von marktüblichen Systemen derzeit nicht erreicht werden kann. Zudem bieten bestehende Maßnahmen aktuell nur unzureichende Möglichkeiten, diese Defizite zu beseitigen. Nachfolgend wird deshalb der Handlungsbedarf von den Defiziten abgeleitet, welche dem Erreichen der gewählten Zielsetzung entgegenstehen. Wie in Abschnitt 1.2 auf Seite 2 beschrieben, besteht die Zielsetzung in der Quantifizierung und Erhöhung der Prozessfähigkeit, indem das charakteristische Verhalten einer Maschine in der Prozesskette berücksichtigt werden soll.

### 4.2 Abgeleiteter Handlungsbedarf

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht in einer Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung. Wie in Abschnitt 3.4 ab Seite 40 beschrieben, berücksichtigen bislang bekannte Maßnahmen mit ähnlicher Zielsetzung die Tatsache, dass durch das Fertigungssystem eine limitierende Größe für die Prozessfähigkeit gegeben ist, nicht ausreichend. Der Aspekt eines maschinenspezifischen Einflusses wurde durch Vorarbeiten zwar beleuchtet, gleichwohl existiert bislang keine Möglichkeit, diesen systematisch zu erfassen, abzubilden und geeignete Maßnahmen zu dessen Reduzierung zu ergreifen.

Der Handlungsbedarf besteht deshalb darin, existierende Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit dahin gehend zu verändern, dass sie die Auswirkungen der besonderen Eigenschaften des Fertigungssystems berücksichtigen und möglichst kompensieren. Zudem ist es notwendig, die Berücksichtigung des maschinenspezifischen Einflusses zu systematisieren, um eine breite Anwendbarkeit zu erreichen. Dies soll durch die Entwicklung einer Methode ermöglicht werden, deren Anforderungen im folgenden Abschnitt erläutert werden.

### 4.3 Anforderungen an eine Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit

Um einen hohen Nutzen der zu entwickelnden Methode zu gewährleisten, müssen die durch potenzielle, industrielle Anwender definierten Randbedingungen berücksichtigt werden. Die nachfolgende Auflistung spiegelt die Randbedingungen sowie die daraus resultierenden Anforderungen an die Methode wider:

- Das vorhandene Prozess- und Erfahrungswissen muss genutzt werden können.  
Die über eine Vielzahl an Bauprozessen gesammelten Informationen sollen für eine weitere Verwendung genutzt werden können. Die Methode muss somit Daten aus unterschiedlichen Quellen mit variierender Detaillierung erfassen und verarbeiten können.
- Die Anwendbarkeit der Methode muss weitgehend unabhängig von einem bestehenden Fertigungssystem gegeben sein.  
Abhängigkeiten von konstruktiven Ausgestaltungen einzelner Maschinenhersteller sind zu vermeiden. Zudem sind vorhandene Programme möglichst weiter zu nutzen. Den Anwendern soll dadurch ermöglicht werden, die Methode auch ohne externe Unterstützung einführen und nutzen zu können, was



### 4.3 Anforderungen an eine Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit

---

insbesondere in restriktiven Anwendungsfällen (z. B. bedingt durch Geheimhaltung) von Relevanz sein kann.

- Die Methode muss an neue Erfordernisse angepasst werden können.  
Bei der Konzipierung der Methode ist darauf zu achten, dass diese modular gestaltet wird. Eine Erweiterung oder Anpassung, z. B. auf bzw. an branchenspezifische Anforderungen, soll so weitgehend ermöglicht werden.
- Die durch die Anwendung der Methode vorgenommenen Änderungen am Prozess, an der Maschine oder an den Daten müssen reproduzierbar und nachvollziehbar sein.  
Diese Anforderung impliziert, dass unter der Verwendung identischer Eingangsdaten stets identische Ausgangsdaten generiert werden. Ferner ist eine gut verständliche Dokumentation der Änderungen anzustreben.
- Es ist anzustreben, dass die Methode frei von Einschränkungen oder Beschränkungen auf einzelne Verfahren ist.  
Die zu entwickelnde Methode ist so zu formulieren, dass eine Anwendung für alle in der Richtlinie VDI 3404 (2009) beschriebenen Verfahren möglich ist.
- Der durch die Anwendung der Methode entstehende Mehraufwand ist möglichst gering zu halten.  
Um eine wirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen, ist ein hoher Automatisierungsgrad anzustreben. Einschränkend sei erwähnt, dass dies im Gegensatz zu einer serientauglichen Lösung für eine prototypische Umsetzung der Methode nicht relevant ist.

Kapitel 5 greift diese Anforderungen auf und stellt die Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung vor.



# 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

## 5.1 Vorgehen im Kapitel

Aufbauend auf dem dargelegten Handlungsbedarf wird nachfolgend eine Methode aufgezeigt, mit welcher eine maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit erreicht werden soll. Abbildung 17 stellt das zugrunde liegende Vorgehen zur Berücksichtigung der Maschinencharakteristik dar.

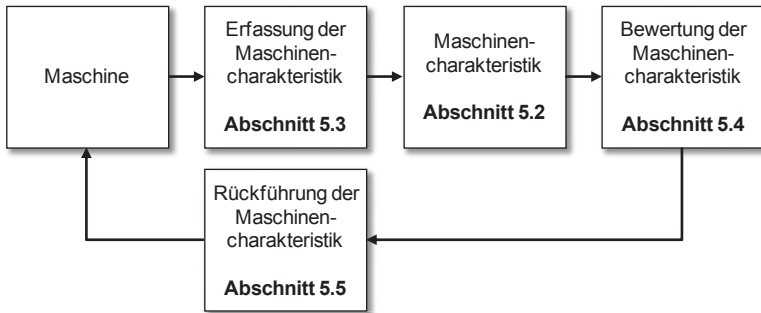


Abbildung 17: Vorgehen zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit

Einführend wird der Begriff *Maschinencharakteristik* formal definiert. Anschließend wird aufgezeigt, wie die Charakteristik einer Maschine ermittelt wird. Möglichkeiten zur Bewertung der Auswirkungen der Maschinencharakteristik auf die Prozessfähigkeit werden in Abschnitt 5.4 verdeutlicht. Abschließend wird in Abschnitt 5.5 erläutert, wie die Maschinencharakteristik auf die Maschine zurückgeführt werden kann, um eine Erhöhung der Prozessfähigkeit zu erreichen.

Die Rückführung ist nur notwendig, wenn die Bewertung ergeben hat, dass die Maschinencharakteristik für den Anwendungsfall unzulässige Auswirkungen am Prozess bzw. an den Werkstücken hervorruft. Durch die Rückführung wird eine kaskadierte Regelschleife geschlossen, welche der Prozessregelung übergeordnet ist. Bei der Maschinencharakteristik handelt es sich um eine Hilfsregelgröße, welche die Prozessregelung unterstützt. Durch die Verwendung einer kaskadierten Regelstruktur ist zu erwarten, dass ein besseres Verhalten erreicht

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

wird, als dies durch den alleinigen Einsatz der Prozessregelung möglich wäre (FÖLLINGER 1994).

### 5.2 Definition des Begriffs *Maschinencharakteristik*

Der Begriff *Charakteristik* ist nach DUDEN (2011) als eine „treffende Schilderung der kennzeichnenden Merkmale (...) einer Sache“ definiert. Ein *Merkmal* wiederum wird beschrieben als ein unterscheidendes Zeichen, an dem eine bestimmte Sache erkennbar wird. Die Maschinencharakteristik fasst alle Merkmale zusammen, welche das sie beschreibende Fertigungssystem von einem anderen Fertigungssystem differenzierbar machen. Sie steht niemals alleine, sondern bezieht sich immer auf ein Referenzsystem (vgl. Abbildung 18). Als Merkmale können beispielsweise die erzielbaren mechanischen oder geometrischen Werkstückeigenschaften genannt werden. Diese können für eine Maschine als Referenz definiert werden. Eine weitere Maschine kann Unterschiede hinsichtlich dieser Referenzwerte aufweisen, welche zu der definierten Maschinencharakteristik führen.

Unter den theoretisch möglichen Voraussetzungen identischer Eingangsparameter und identischer Umgebungsbedingungen für mehrere Prozesse bewirken systematische und unvermeidbare stochastische Störgrößen einen Unterschied in den Ergebnissen dieser Prozesse (JACOBS 2000). Die Größe der Unterschiede ist dabei abhängig von der Robustheit der Systeme gegenüber diesen Störeinflüssen. Während der stochastische Anteil nicht berücksichtigt werden kann, fließt der systematische Anteil in das Modell für die Maschinencharakteristik mit ein. Systematische Störgrößen sind z. B. bauart- oder betriebsbedingte Einflüsse, welche von der Anlagensteuerung und der Prozessregelung nicht berücksichtigt werden. Diese können wiederum in statische und dynamische Störgrößen untergliedert werden.

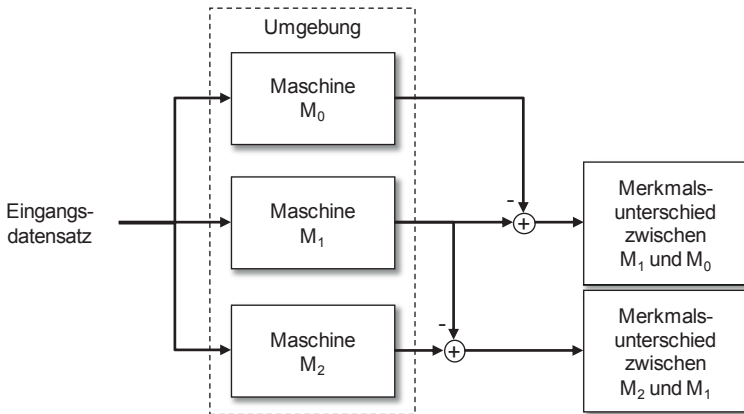


Abbildung 18: Definition des Begriffs Maschinencharakteristik als Merkmalsunterschied zwischen jeweils zwei Maschinen

Das Referenzsystem kann ein theoretisches, idealisiertes Maschinen- und Prozessmodell sein. Bei diesem wird davon ausgegangen, dass sämtliche Anforderungen hinsichtlich der Prozess- und der Werkstückqualität erfüllt werden. Als Referenzsystem kann ebenso ein beliebiges anderes Fertigungssystem verwendet werden. Zweckmäßig ist die Wahl eines Systems als Referenz, welches den gestellten Anforderungen an die Prozessfähigkeit genügt. Wie vorstehend beschrieben, ist die Maschinencharakteristik  $C_{M,M^*}$  die Summe aller Merkmale, durch welche die Maschine  $M$  von dem Referenzsystem  $M^*$  unterschieden werden kann. Handelt es sich bei dem Referenzsystem  $M^*$  um das theoretische, idealisierte Maschinen- und Prozessmodell, so wird nachfolgend die verkürzte Schreibweise  $C_M$  für die Charakteristik der Maschine  $M$  verwendet.

## 5.3 Erfassung der Maschinencharakteristik

### 5.3.1 Allgemeines

Die Erfassung der Maschinencharakteristik ist elementar, um diese in einem nachgelagerten Schritt bewerten und rückführen zu können. Da es sich bei ihr um ein abstraktes Modell handelt, kann die Maschinencharakteristik nicht direkt gemessen werden, sondern sie muss von der Maschine bzw. dem Prozess abgeleitet und in Bezug auf eine Referenzmaschine gesetzt werden. Ein Fertigungssystem wird durch die Ein- und Ausgänge charakterisiert, welche in die Gruppen

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

*Energie, Stoff* und *Signal* unterteilt werden können (PAHL 2005). Abbildung 2 auf Seite 9 zeigt die systemtechnische Darstellung eines additiven Fertigungssystems auf.

Bei der Erfassung der Maschinencharakteristik wird davon ausgegangen, dass die Ausgangsgrößen des Fertigungssystems Merkmale enthalten, welche eine Beschreibung des produzierenden Systems ermöglichen. Abbildung 19 zeigt die Möglichkeiten zur Ableitung der Maschinencharakteristik aus den Ausgangsgrößen eines additiven Fertigungssystems der Gruppen *Energie, Stoff* und *Signal*.

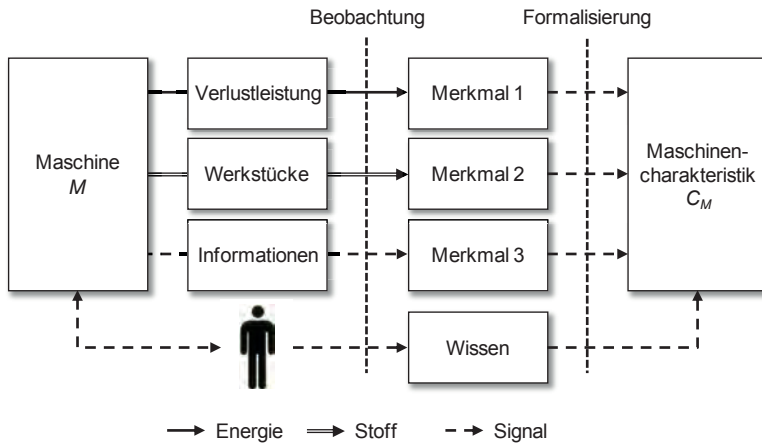


Abbildung 19: Möglichkeiten zur Ableitung der Maschinencharakteristik aus den Ausgangsgrößen eines additiven Fertigungssystems (in Anlehnung an ESCHEY ET AL. 2011B)

Durch eine Beobachtung der Ausgangsgrößen in Form von Verlustleistungen, Werkstücken und Informationen sollen so Merkmale extrahiert werden, welche eine Beschreibung des Fertigungssystems ermöglichen. Aufgrund unterschiedlicher Ausprägungen der Merkmale ist es notwendig, diese einheitlich zu formalisieren. Neben den drei Gruppen Energie, Stoff und Signal, welche sich auf direkte Ausgangsgrößen des Fertigungssystems beziehen, können auch die Maschinenbediener als Quelle für beschreibende Informationen zu einem Fertigungssystem angesehen werden. Die Maschinenbediener stehen in Verbindung mit der Maschine und dem Prozess und nehmen sowohl eine beobachtende als auch eine steuernde Rolle ein. Hierdurch wird Wissen aufgebaut, welches durch eine Formalisierung ebenfalls für die Maschinencharakteristik verwendet werden kann.

Im nachfolgenden Abschnitt werden zunächst die Ausgangsgrößen der additiven Prozesskette erläutert und der Begriff *Beobachtbarkeit* definiert. Zudem werden Formalisierungsarten vorgestellt, durch welche auch Informationen aus unterschiedlichen Quellen in einheitlichem Format in die Maschinencharakteristik überführt werden können.

### 5.3.2 Beobachtbarkeit von Merkmalen

Zur Ableitung von Merkmalen aus den Ausgangsgrößen ist es notwendig, dass diese beobachtbar sind. In der klassischen Regelungstechnik gilt ein Parameter dann als beobachtbar, wenn sein Wert aus den Messungen eines Ausgangssignals bestimmt werden kann (KALMAN 1960). Umgekehrt wird ein Parameter als nicht beobachtbar bezeichnet, wenn dessen Wert nicht aus dem Ausgangssignal extrahiert werden kann. GREVE & WENTURA (1997) kennzeichnen eine wissenschaftliche Beobachtung als eine absichtliche, geplante Unternehmung mit dem Ziel der Auswertbarkeit der Ergebnisse. Die Beobachtung ist eine Form der Messung, welche wiederum einen potenziellen Teil eines Experiments darstellt. Übertragen auf die Beobachtung eines Merkmals in der additiven Fertigung muss das Merkmal aus den Ausgangsgrößen ableitbar sein.

Die primäre Ausgangsgröße in der additiven Fertigung sind Werkstücke, welche nach dem in Abschnitt 2.2.3 ab Seite 11 beschriebenen Ablauf gefertigt werden. Nach PAHL (2005) kann der Stoffumsatz somit als Hauptfluss für das System bezeichnet werden. Durch die Anwendung unterschiedlicher Analyseverfahren können verschiedenartige Merkmale aus dem gleichen Werkstück extrahiert werden. Dies ist insofern relevant, als dass die additive Fertigung primär für die Herstellung von Kleinserien eingesetzt wird und nur eine begrenzte Menge an Daten vorhanden ist. Durch die Auswertung einzelner Werkstücke auf unterschiedlichen Ebenen können statistisch relevante Aussagemöglichkeiten geschaffen werden (THIE 1999). Bedingt durch den Aufbauprozess können sich bei einem Werkstück verschiedenartige Merkmale ergeben. Durch die Wahl eines ungeeigneten Analyseverfahrens bzw. eines ungeeignet gestalteten Werkstücks kann es vorkommen, dass das Merkmal nicht beobachtet werden kann. Für die Wahl geeignet gestalteter Werkstücke und Analyseverfahren ist ein tief greifendes Prozessverständnis erforderlich.

Die Merkmale zur Beschreibung der Maschinencharakteristik können weiterhin von Ausgangsgrößen abgeleitet werden, welche dem Signalumsatz zugeordnet sind. Der Signalumsatz stellt in additiven Fertigungssystemen einen Nebenfluss dar, da dieser nicht ursächlich für den Betrieb ist, jedoch den Hauptfluss unter-

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

stützt. Beispielsweise wird der in der additiven Fertigung oftmals eingesetzte Laser nicht primär betrieben, um einen Laserstrahl mit einer spezifizierten Kautik zu erzeugen, sondern um die für die Herstellung der Werkstücke notwendige Schichtverfestigung zu ermöglichen. Insofern handelt es sich bei dem Signal *Laserleistung* um eine Ausgangsgröße, welche über eine geeignete Messung erfasst werden kann. Da das primäre Ziel eine Erhöhung der Prozessfähigkeit ist, ist die Relevanz des untersuchten Signals sicherzustellen. Nur bei einer Wirkung des Signals auf die Prozessfähigkeit kann dieses als *relevant* bezeichnet werden.

Der Energieumsatz stellt eine unterstützende Leistung zur Ermöglichung des Haupt- und des Nebenflusses dar. Als Ausgang eines additiven Fertigungssystems aus der Gruppe Energie wird alleine die Verlustleistung definiert (vgl. Abbildung 2 auf Seite 9). Für die weitere Arbeit wird der Energieumsatz nachfolgend nicht mehr betrachtet.

Das Wissen der Maschinenbediener kann als eine weitere unterstützende Leistung zur additiven Fertigung angesehen werden, da die Existenz dieses Wissens für die Erfüllung des Haupt- und des Nebenflusses nicht zwingend erforderlich ist. Die Nutzung dieses Wissens kann jedoch positiv zur Erreichung einer hohen Prozessfähigkeit beitragen. Je robuster ein Fertigungsprozess ausgelegt ist, umso weniger Gewichtung kommt dem Wissen der Maschinenbediener zu.

Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wie die beobachtbaren Merkmale in eine einheitliche Form überführt werden können, um auch eine Nutzung unterschiedlicher Merkmale zu ermöglichen.

### 5.3.3 Formalisierung beobachtbarer Merkmale

#### 5.3.3.1 Allgemeines

Wie vorstehend beschrieben, können Merkmale aus den Ausgangsgrößen einer additiven Fertigungsmaschine extrahiert werden. Zudem ist eine Beschreibung von Merkmalen auch durch die Maschinenbediener möglich. Da die Merkmale unterschiedlichen Quellen entstammen, weisen diese eine große Bandbreite hinsichtlich Detailgrad und Ausdruck auf. Die Formalisierung ist ein Vorgang, bei welchem ein Sachverhalt in einer strengen Form dargestellt wird (FORD & FORD 1993). Durch die Einhaltung einer strengen Syntax soll die Lesbarkeit, Verwendbarkeit und Auswertbarkeit auch für automatisierte Systeme ermöglicht werden. Aufgrund von Unterschieden in der Beschreibung von Sachverhalten kann es zu



Fehleinschätzungen oder Missverständnissen kommen, welche durch die Einhaltung einer formallogischen Sprache reduziert werden können (WALTHER 2001).

Im Sinne eines wissensbasierten Systems stellen Merkmale Informationen dar, welche durch eine Auswertung der Rohdaten, z. B. durch eine Analyse von Messwerten, gebildet werden. In wissensbasierten Systemen wird dann von Wissen gesprochen, wenn eine Vielzahl an Informationen verknüpft und voneinander unterschieden werden kann (UMKEHRER 2000). Wie in Abschnitt 5.2 ab Seite 56 beschrieben, stellt die Maschinencharakteristik die Summe aller Merkmale dar, welche eine Maschine von einer anderen Maschine unterscheidbar machen. Die Maschinencharakteristik kann deshalb als eine Art Wissensspeicher angesehen werden.

Nachfolgend werden drei zueinander alternative Formalisierungsarten vorgestellt, durch welche eine Repräsentation des Wissens erzielt werden soll. Es handelt sich dabei um die sprachliche, die regelbasierte und die mathematische Formalisierung, welche abhängig von der Detaillierung eines Sachverhalts ausgewählt werden kann. Als exemplarischer Sachverhalt wird die von COREMANS (1999) und SKRYNECKI (2010) untersuchte Positionsabhängigkeit der Laserstrahlleistung dargestellt. Abbildung 20 veranschaulicht die von COREMANS (1999) gemessene Laserstrahlleistung  $P_L$ , welche an unterschiedlichen Positionen im Bauraum des untersuchten Systems gemessen wurde.

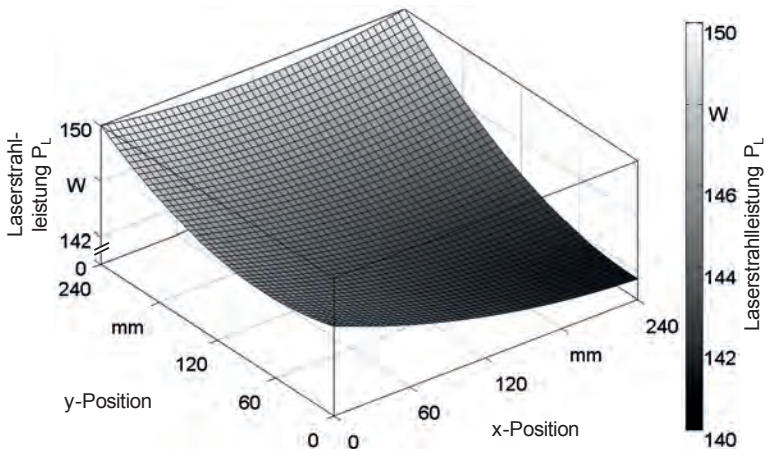


Abbildung 20: Positionsabhängigkeit der Laserstrahlleistung (in Anlehnung an COREMANS (1999))

### 5.3.3.2 Sprachliche Formalisierung

Eine sprachliche Formalisierung kann eine Vielzahl an Informationen beinhalten, welche gleichzeitig einen hohen Grad an Allgemeinheit aufweisen. Dies korrespondiert mit der Tatsache, dass die Maschinenbediener ihr Expertenwissen oftmals nicht explizit wiedergeben können. Um deren umfangreiches Wissen trotzdem aufzugreifen und nutzbar zu machen, können Expertenbefragungen durchgeführt werden (BOGNER ET AL. 2005). Die Aussagen enthalten dann Informationen bezüglich der Charakteristik des Fertigungssystems. Eine exemplarische Aussage zu dem vorstehend erläuterten Sachverhalt einer positionsabhängigen Laserstrahlleistung, welche im Rahmen einer Expertenbefragung entstehen kann, könnte wie folgt lauten:

„Werkstücke mit hohen Maßhaltigkeitsanforderungen dürfen nicht im vorderen, rechten Bereich des Bauraumes der Maschine positioniert werden.“

Diese exemplarische Aussage basiert auf dem Expertenwissen eines Maschinenbedieners, welches u. U. über einen langen Zeitraum aufgebaut wurde und deshalb als fundiert angesehen werden kann. Die Korrelation zwischen Maßhaltigkeit und Laserstrahlleistung ist dem Maschinenbediener nicht im Detail bekannt, da keine Untersuchungen hierüber durchgeführt wurden. Unter der Prämisse, dass die Aussage korrekt ist, enthält sie eine wertvolle Information, da hierdurch die prinzipielle Verteilung der erzielbaren Maßhaltigkeit innerhalb des Bauraumes bekannt wird. Der hohe Grad an Allgemeinheit der sprachlichen Formalisierung ist dadurch ersichtlich, dass keine nähere Detaillierung des Bereiches sowie keine Quantifizierung der Maßhaltigkeit angegeben werden. Ebenso sind keine detaillierten Informationen wie z. B. Ausnahmen und Randbedingungen des Sachverhalts in der Aussage enthalten, was nicht bedeutet, dass diese nicht existent sind. Stellen die Ausnahmen und die Randbedingungen implizites Wissen des Maschinenbedieners dar, so besteht die Möglichkeit, dass diese als nicht erwähnenswert erachtet wurden. Insofern ist die sprachliche Formalisierung eine Möglichkeit, das vorhandene Expertenwissen zum Verhalten einer Maschine zu erfassen und für weiterführende Maßnahmen nutzbar zu machen. Wie in Sprachen üblich, sind die Aussagen jedoch oftmals kontextabhängig. Der eigentliche Vorgang der Formalisierung besteht in der Aufnahme und Protokollierung des Expertenwissens und beginnt bei der Wahl der Fragen, die den Experten gestellt werden sollen.

### 5.3.3.3 Regelbasierte Formalisierung

Die ein Fertigungssystem beschreibenden Merkmale können zudem durch eine regelbasierte Formalisierung nutzbar gemacht werden. Eine regelbasierte Formalisierung folgt einer klassischen Wenn-Dann-Beziehung.

*WENN (Prämisse) DANN (Konklusion)*

Die Regel gilt als erfüllt, wenn die Prämisse zutrifft. Als Konsequenz daraus wird die Konklusion gültig. Die Prämisse kann weitere Unterbedingungen logisch miteinander verknüpfen, welche nur die Zustände *wahr* und *falsch* annehmen können. Es ist somit auch möglich, komplexere Sachverhalte zu formalisieren. Bedingt durch die Darstellungsart eignet sich die regelbasierte Formalisierung zur Anwendung in maschinellen Systemen, da einzelne Regeln in sich widerspruchsfrei sind.

Der exemplarische Sachverhalt einer positionsabhängigen Laserstrahlleistung kann beispielsweise durch einen Parametersatz berücksichtigt werden, welcher den Bauraum des Fertigungssystems in vier Quadranten unterteilt. Abhängig von der Position eines Werkstücks kann dann der für diesen Quadranten geeignete Parametersatz verwendet werden.

*WENN (Werkstückposition im 1. Quadrant) DANN (Parametersatz 1)*

*WENN (Werkstückposition im 2. Quadrant) DANN (Parametersatz 2)*

*WENN (Werkstückposition im 3. Quadrant) DANN (Parametersatz 3)*

*WENN (Werkstückposition im 4. Quadrant) DANN (Parametersatz 4)*

Die regelbasierte Formalisierung eines Sachverhalts ist dann sinnvoll, wenn dieser dadurch detaillierter quantifiziert werden kann, als bei einer sprachlichen Formalisierung. Die Überführung eines Merkmals aus sprachlicher Formalisierung in eine regelbasierte Formalisierung ist durch experimentelle Untersuchungen möglich. Der eigentliche Vorgang der Formalisierung besteht darin, von den Merkmalen Regeln abzuleiten.

### 5.3.3.4 Mathematische Formalisierung

Durch eine mathematische Formalisierung wird ein Sachverhalt in einer Funktion dargestellt, welche eine Beziehung zwischen zwei Mengen definiert. Die Funktion  $f$  ordnet hierbei jedem Element  $c$  aus der Definitionsmenge  $C$  genau ein Ele-

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

ment  $d$  aus der Zielmenge  $D$  zu. Durch die Abbildungsvorschrift  $f$  ist die Zuordnung zwischen der Definitionsmenge und der Zielmenge eindeutig beschrieben:

$$f: C \rightarrow D, c \mapsto d$$

Eine Umkehrung der Funktion von der Zielmenge auf die Definitionsmenge ist nicht immer eindeutig möglich, da auch mehreren Elementen der Zielmenge ein Element aus der Definitionsmenge zugeordnet werden kann. Bedingt durch die eindeutige Abbildungsvorschrift eignet sich die mathematische Formalisierung für eine automatisierte Auswertung.

Die Einzelmessungen der positionsabhängigen Laserstrahlleistung können, wie in Abbildung 20 auf Seite 61 angedeutet, durch eine Regressionsfläche angenähert werden, welche durch eine Abbildungsvorschrift definiert wird. Zwischen den einzelnen Messpunkten ist so eine Interpolation der zu erwartenden Laserstrahlleistung möglich. Die Abbildungsvorschrift kann genutzt werden, um positionsabhängig eine Kompensation der Laserstrahlleistung durch einen angepassten Parametersatz zu erzielen.

Die mathematische Formalisierung weist den höchsten Grad an Eindeutigkeit und den geringsten Grad an Allgemeinheit auf. Durch diese Eindeutigkeit ist der Aufwand zur Ermittlung derselben jedoch am höchsten. Die mathematische Formalisierung eignet sich für Merkmale, welche z. B. durch umfangreiche Experimente quantifiziert werden können. Die eigentliche Formalisierung besteht in der Überführung der experimentell ermittelten Daten in eine Abbildungsvorschrift.

## 5.4 Bewertung der Maschinencharakteristik

### 5.4.1 Allgemeines

Merkmale, welche das Verhalten eines Fertigungssystems charakterisieren, können wie vorstehend beschrieben formalisiert werden. Da die Maschinencharakteristik lediglich eine Summe formalisierter Merkmale darstellt, ist sie nicht abgeschlossen, sondern kann durch die Aufnahme weiterer Merkmale um zusätzliche charakteristische Eigenschaften einer Maschine ergänzt werden.

Zur Erhöhung der Prozessfähigkeit durch die Berücksichtigung des Verhaltens einer Maschine ist es notwendig, die Auswirkungen der Maschinencharakteristik auf die Prozessfähigkeit zu bewerten. Die Bewertung umfasst dabei die Darstel-

lung der Maschinencharakteristik sowie die eigentliche Bewertung der Auswirkungen.

### 5.4.2 Darstellung der Maschinencharakteristik

Die Darstellung der Maschinencharakteristik hat zum Ziel, für eine nachfolgende Bewertung der Auswirkungen eine Entscheidungsgrundlage zu liefern. Hierfür ist die Wahl einer zweckmäßigen Darstellungsart entscheidend. Die Darstellung ist nur für Merkmale relevant, deren Wirkungen auf die Prozessfähigkeit bekannt sind, da nur hierfür eine nachfolgende Bewertung durchgeführt werden kann. Zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung sind u. a. folgende Darstellungsarten von Merkmalen geeignet:

- **Zeitlicher Verlauf eines Merkmalswerts**  
Bei dieser Darstellungsart wird ein Merkmalswert über eine Zeitspanne aufgetragen. Zusätzlich können Warn- und Eingreifgrenzen definiert werden, bei deren Über- bzw. Unterschreiten Gegenmaßnahmen ergriffen werden müssen. Der zeitliche Verlauf eines Merkmalswerts ist von Interesse, wenn eine langfristige Veränderung der Maschine und damit auch der Maschinencharakteristik untersucht werden soll. So können beispielsweise Änderungen der Leistungsabgabe eines Lasers aufgrund von Alterungserscheinungen erkannt und geeignete Maßnahmen abgeleitet werden.
- **Positionsabhängigkeit eines Merkmalswerts**  
Die Darstellung der Positionsabhängigkeit eines Merkmalswerts ist geeignet, um den Bauraum des additiven Fertigungssystems in Regionen gleicher Wertebereiche zu unterteilen. Die Regionen können dann als Entscheidungsgrundlage für weitere Maßnahmen dienen. Exemplarisch sei hier die von CO-REMANS (1999) untersuchte Verteilung der Laserstrahlleistung genannt.
- **Häufigkeitsverteilung eines Merkmalswerts**  
Durch die Verwendung eines Histogramms kann die Häufigkeitsverteilung der Werte eines Merkmals untersucht werden. Es kann als Entscheidungsgrundlage verwendet werden, um die Einhaltung von Anforderungen zu überprüfen.
- **Bildung einer Kennzahl**  
Eine Kennzahl bildet den höchsten Abstraktionsgrad bezüglich der Darstellung der Maschinencharakteristik, da sämtliche Informationen zu einer Einheit verdichtet werden. Eine Kennzahl eignet sich somit zur Überprüfung des Status eines Fertigungssystems auf einem abstrakten Niveau. Die in Abschnitt

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

2.3.5 ab Seite 22 eingeführte Kenngröße  $C_p$  wird beispielsweise häufig mit einem anwendungsspezifischen Wert verglichen, um eine Aussage bezüglich der Fähigkeit des Prozesses abgeben zu können.

### 5.4.3 Bewertung der Auswirkungen

Zur Bewertung der Auswirkungen der Maschinencharakteristik auf die Werkstückqualität sind die Anforderungen an die zu fertigenden Werkstücke maßgeblich. Der Bedarf zur Berücksichtigung der Maschinencharakteristik im Fertigungsprozess ergibt sich anwendungsspezifisch immer erst dann, wenn die potenziellen Auswirkungen eine vorgegebene Toleranzgrenze über- bzw. unterschreiten. Die Toleranzgrenze kann dabei sowohl für das einzelne Werkstück als auch für das auf dem Fertigungssystem zu produzierende Werkstückspektrum ermittelt werden. Das Ergebnis der Bewertung kann in eine der nachfolgend beschriebenen Möglichkeiten gegliedert werden:

- Die Anforderungen werden eingehalten.  
Dies bedeutet, dass die durch die Maschinencharakteristik hervorgerufenen Auswirkungen auf die Werkstückmerkmale in einem tolerierten Bereich liegen. In diesem Falle ist keine weitere Berücksichtigung der Maschinencharakteristik notwendig. Eine langfristige Überwachung und Abbildung (z. B. mittels statistischer Prozesskontrolle, vgl. Abschnitt 2.3.4 ab Seite 19) ist jedoch sinnvoll, um das Überschreiten von Warn- und Eingreifgrenzen zu detektieren.
- Die Anforderungen werden nicht eingehalten.  
Die mit dem Werkstück verbundenen Anforderungen werden durch die Auswirkungen der Maschinencharakteristik zum Teil verletzt. Eine weitere Berücksichtigung der Maschinencharakteristik ist notwendig, um die geforderte Qualität produzieren zu können. Basierend auf den Randbedingungen kann eine der beiden folgenden Möglichkeiten angewendet werden, um die Anforderungen zu erreichen:
  1. Veränderung von Fertigungsparametern  
Ist durch eine reine Veränderung von Fertigungsparametern (z. B. Positionierung und Orientierung eines Werkstücks im virtuellen Bauraum) die Einhaltung der Anforderungen möglich, so wird primär diese Möglichkeit genutzt, da diese aufwandsarm umgesetzt werden kann.

### 2. Durchführung von Kompensationsmaßnahmen

Ist die Einhaltung der Anforderungen mit einer Veränderung von Fertigungsparametern nicht möglich, so müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden, welche eine Kompensation der Maschinencharakteristik bewirken. Die Möglichkeiten hierzu werden im nachfolgenden Abschnitt 5.5 erläutert.

- Die Einhaltung der Anforderungen kann vorab nicht überprüft werden. Die für die Bewertung zugrunde liegende Maschinencharakteristik weist für den Anwendungsfall keine ausreichende Datenbasis auf. Um die Auswirkungen der Maschinencharakteristik bewerten zu können, ist eine weitere vervollständigung der Maschinencharakteristik notwendig.

## 5.5 Rückführung der Maschinencharakteristik

### 5.5.1 Allgemeines

Nach der Beschreibung der Vorgehensweise zur Erfassung und Bewertung der Maschinencharakteristik in den vorangegangenen Abschnitten soll nachfolgend erläutert werden, wie die formale Beschreibung des Systems verwendet werden kann, um Merkmale des Prozesses oder der hergestellten Werkstücke zu optimieren. Die Maschinencharakteristik wird dabei der von ihr beschriebenen Maschine zugeführt, um so eine Kompensation der Charakteristik zu erreichen. Durch die Kompensation soll das Verhalten des ausgewählten Referenzsystems erzielt werden.

In diesem Zusammenhang ist der Begriff *Optimierung* als eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit zu verstehen, dass die Anforderungen an ein Merkmal durch ein Fertigungssystem erfüllt werden können. Analog zur Beobachtbarkeit für die Erfassung wird deshalb einleitend im Abschnitt 5.5.2 der Begriff der *Steuerbarkeit* für die Rückführung definiert. Anschließend werden die alternativen Möglichkeiten zur Rückführung der Maschinencharakteristik vorgestellt (vgl. Abbildung 21).

Es muss hierbei unterschieden werden zwischen einer direkten und einer indirekten Rückführung. Bei der direkten Rückführung wird die Maschinencharakteristik unmittelbar in der Prozesskette zur additiven Fertigung verwendet. Bei der indirekten Rückführung erfolgt eine Nutzung der Maschinencharakteristik in den im Abschnitt 3.4 ab Seite 40 beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Pro-

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

zessfähigkeit. Diese Maßnahmen wirken sich nur mittelbar auf den eigentlichen Prozess aus.

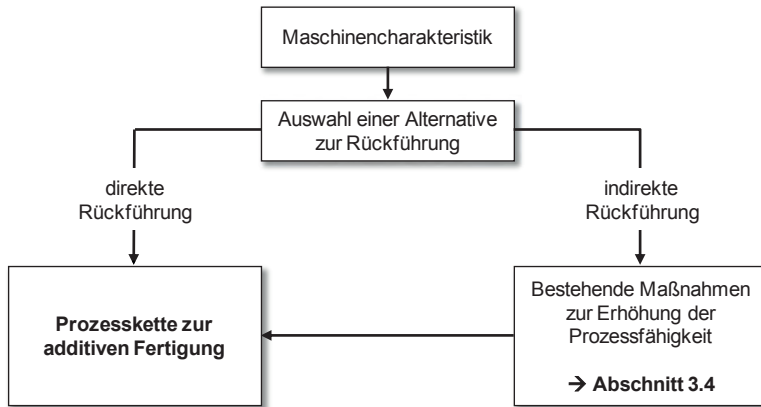


Abbildung 21: Möglichkeiten zur Rückführung der Maschinencharakteristik

Durch die direkte Rückführung in die Prozesskette zur additiven Fertigung ergeben sich mehrere Optionen, welche ab Abschnitt 5.5.3 beschrieben werden. Hierbei werden jedoch nur die Prozessschritte berücksichtigt, welche zeitlich vor dem Aufbauprozess der Werkstücke liegen. Die Nachbehandlung sowie die Qualitätssicherung als Ziel für die Rückführung der Maschinencharakteristik werden insofern nachfolgend nicht mehr betrachtet.

### 5.5.2 Steuerbarkeit von Merkmalen

In der klassischen Regelungstechnik ist ein System dann steuerbar, wenn ein Zustand in endlicher Zeit durch einen geeigneten Steuervektor in einen beliebigen anderen Zustand überführt werden kann (KALMAN 1960). Demgegenüber gilt ein System als nicht steuerbar, wenn keine Möglichkeit existiert, dieses zielgerichtet durch eine Anpassung von Parametern zu beeinflussen. Die Attribute *steuerbar* und *beobachtbar* sind als unabhängig voneinander zu betrachten. Auch wenn ein Merkmal beobachtbar ist, folgt daraus nicht, dass dieses zwangsläufig auch gezielt beeinflusst werden kann. Ferner ist der Fall möglich, dass ein Merkmal steuerbar, jedoch nicht beobachtbar ist. Nach BURGER (2008) existiert für ein steuerbares System immer auch ein Regler, welcher es stabilisiert und auf einen Zielwert führen kann.



Die Zuweisung der Attribute *steuerbar* bzw. *nicht steuerbar* obliegt dabei dem Anwender. Auch wenn ein Merkmal, basierend auf dem theoretischen Prozessmodell, als gezielt beeinflussbar gilt, so muss für den Anwendungsfall der geeignete Steuervektor nicht zwangsläufig bekannt sein. Zur gezielten Beeinflussung eines Produktes bzw. eines Prozesses ist es deshalb notwendig, zu wissen, welche Wirkungen die Stellgrößen, Steuergrößen und Störgrößen hervorrufen (KLEIN 2007). Die Schaffung von Wissen bezüglich funktionaler Zusammenhänge zwischen diesen Größen und den resultierenden Merkmalsänderungen ist dabei ein Ziel aktueller Forschungsarbeiten (vgl. Abschnitt 3.4 ab Seite 40). Steuerbare Merkmale sind weiter zu untergliedern in theoretisch steuerbare sowie bekannt steuerbare Merkmale. Für die gezielte Anwendung der Maschinencharakteristik zur Beeinflussung bestimmter Merkmale sind nur bekannt steuerbare Merkmale von Relevanz, da nur für diese die funktionalen Zusammenhänge bekannt sind.

### 5.5.3 Direkte Rückführung in die Konstruktion

HOFFMANN (2002) definiert die Konstruktion als die „Gestaltung einzelner Werkstücke sowie die Zusammensetzung der Werkstücke zu einem Ganzen“. Nach VDI 2221 (1993) gehört die Konstruktion zur Systementwicklung innerhalb des Produktlebenszyklus. Die Konstruktion ist als die zeitlich frühestmögliche Phase anzusehen, in welche die Maschinencharakteristik zurückgeführt werden kann. Die im Produktlebenszyklus zeitlich vorgelagerten Phasen haben keinen Bezug zum später verwendeten Fertigungssystem. Die Berücksichtigung der Charakteristik der Maschine ist insofern für diese Phasen irrelevant.

Das rechnerunterstützte Konstruieren mittels 3D-CAD-Systemen ist heute als Standardvorgehen anzusehen (PAHL 2005). Der Konstrukteur bedient sich dabei sogenannter Geometriemodellierer, um die Ergebnisse der Konzeptphase gestalterisch umzusetzen. Basierend auf einfachen geometrischen Grundelementen (z. B. Quader, Zylinder) können durch deren Kombination komplexe Körper erzeugt werden. Durch die Verknüpfung verschiedener, u. U. bereits kombinierter Grundelemente kann das Objekt parametrisiert modelliert werden. Die Verknüpfung erfolgt dabei durch Zwangsbedingungen und Beziehungen zueinander. Konkret wird unter der parametrischen Modellierung „die Möglichkeit der Veränderung eines jeden Attributes eines geometrischen Elementes (z. B. Lage, Abmessung, Materialeigenschaft, Farbe) zu jedem Zeitpunkt der Konstruktion“ verstanden (HOFFMANN 2002). Als Ergänzung hierzu kann die featurebasierte Modellierung genannt werden. Features werden dabei als Semantikträger defi-

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

niert, welche die einzelnen Geometriemerkmale des Konstruktionselements um weitere Bedeutungen ergänzen (HOFFMANN 2002; TASSI 2005; MOLCHO ET AL. 2009). Die Ergänzungen können dabei für die Fertigung, die Montage oder die Qualitätssicherung relevante Informationen umfassen.

Die Maschinencharakteristik kann als eine Art der Semantik aufgefasst werden. Jedem Konstruktionselement kann die Information zugewiesen werden, welches spezielle Verhalten der Maschine für das jeweilige Konstruktionselement zu erwarten ist. Dies können sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Form- und Lagetoleranzen als auch weitere qualitätsrelevante Eigenschaften wie die Oberflächenqualität sein. Dem Konstrukteur kann damit eine Möglichkeit der Darstellung zur Verfügung gestellt werden, mit der die durch die Maschinencharakteristik resultierenden Abweichungen des additiv gefertigten Werkstücks von der Konstruktion an transparent gemacht werden können. Durch eine gezielte Anpassung der Konstruktionselemente ist es dann möglich, innerhalb der geforderten Toleranzbereiche zu bleiben.

Besonders erwähnt werden muss in diesem Zusammenhang, dass durch die vorstehend beschriebenen Änderungen der Konstruktionselemente eventuell von den aus der Konzeptphase formulierten Randbedingungen abgewichen werden muss. Das Werkstück wird gewissermaßen außerhalb der Vorgaben konstruiert, um nach dem eigentlichen Herstellprozess die Toleranzgrenzen wieder einhalten zu können. Ob eine solche Abweichung von den bisherigen Konstruktionsabläufen zulässig ist, ist anwendungs- und branchenspezifisch zu entscheiden. Eine geeignete Dokumentation ist jedoch zwingend erforderlich. Das von WITT ET AL. (2010) beschriebene Assistenzsystem zur Modellierung kann als eine für die additive Fertigung praktikable Möglichkeit betrachtet werden, mit welcher dem Konstrukteur eine Unterstützung durch Konstruktionsrichtlinien angeboten wird. Zudem kann festgestellt werden, dass durch die Verwendung der featurebasierten Modellierung bereits in der Konstruktionsphase Festlegungen erfolgen müssen, welche bislang erst in einem anschließenden Prozessschritt getroffen wurden. Unter der Annahme, dass die Maschinencharakteristik positionsabhängige Merkmale umfasst, muss die Positionierung und Orientierung des Werkstücks nun bereits in der Konstruktion definiert werden. Die Tätigkeit der Platzierung der Werkstückdaten im virtuellen Bauraum einer Maschine ist somit nicht mehr in der Bauvorbereitung durchzuführen und gilt als bereits abgeschlossen, da die Werkstücke gezielt für eine Position und Orientierung konstruiert wurden. Zudem können nicht alle mechanischen Werkstückeigenschaften durch die Konstruktion beeinflusst werden. Die Zulässigkeit konstruktiver Veränderungen als

Folge der vorgegebenen Randbedingungen ist jedoch anwendungsspezifisch zu klären.

### 5.5.4 Direkte Rückführung in die Vorbereitung

Die Phase der Vorbereitung ist in der Prozesskette zwischen der Konstruktion der Werkstücke und dem additiven Aufbauprozess positioniert. Die Hauptaufgabe dieser Phase liegt in der Sicherstellung der Möglichkeit zur Herstellung des Werkstücks mithilfe eines additiven Fertigungsverfahrens, verbunden mit einer entsprechenden Aufbereitung des Werkstücks. Die Hauptaufgabe kann in folgende Teilaufgaben untergliedert werden:

1. Festlegung der Position und der Orientierung des Werkstücks im virtuellen Bauraum des Fertigungssystems
2. Anbringung von Aufmaßen an Geometriemerkmalen, welche in der Anwendung als Funktionsmerkmale dienen
3. Erstellung und Anbringung von Stützstrukturen
4. Unterteilung in einzelne zu fertigende Schichten und Zuweisung von Fertigungsparametern

Abhängig vom gewählten Fertigungsverfahren müssen nicht alle vorstehend genannten Aufgaben durchgeführt werden, bzw. es gelten hierfür unterschiedliche Randbedingungen. Zudem werden die Aufgaben nicht nur für einzelne Werkstücke ausgeführt, sondern für eine Vielzahl von Werkstücken, welche zur Sicherstellung eines wirtschaftlichen Herstellprozesses parallel in einem Aufbauprozess generiert werden. Die Werkstücke werden meist in triangulierter Form an die Vorbereitung übergeben. Zur Durchführung der Teilaufgaben können Programme verwendet werden, welche speziell hierfür entwickelt wurden. Alternativ können spezialisierte Werkzeuge eingesetzt werden, welche die Verarbeitung triangulierter Daten unterstützen.

Für die Berücksichtigung der Maschinencharakteristik können die Teilaufgaben der Vorbereitung angepasst bzw. erweitert werden.

1. Zuweisung geeigneter Positions- und Orientierungsparameter  
Das Platzieren der Werkstücke im virtuellen Bauraum einer additiven Fertigungsmaschine ist eine Tätigkeit, welche vorwiegend auf dem Erfahrungswissen des Anwenders beruht. Es obliegt hierbei dem Anwender, eine für seine Zielgrößen (z. B. Bauzeit, Kosten, Qualität) optimale Position und Orientierung zu identifizieren. Ferner gibt es die Möglichkeit, diesen Vorgang durch Algorithmen zu automatisieren (CHENG ET AL. 1995; DANJOU 2010;

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

MAJHI ET AL. 2000; WEST & ROSEN 2001). Zur Berücksichtigung der Maschinencharakteristik ist es möglich, bestehende Ansätze so zu erweitern, dass die ausführende Stelle (Mensch, Algorithmus) die an einer Position und mit einer Orientierung resultierenden Eigenschaften als Kriterium berücksichtigt. Für die algorithmische Lösung kann die in Regeln formalisierte Beschreibung der Maschinencharakteristik verwendet werden. Zur Festlegung der Position eines Werkstücks können Bediener z. B. dadurch unterstützt werden, dass der virtuelle Bauraum einer Maschine derart visualisiert wird, dass Qualitätsbereiche sichtbar werden. Der Bediener kann dann intuitiv ein Werkstück in einem Bereich positionieren, in welchem die Qualitätsanforderungen eingehalten werden können. Durch eine maschinenspezifische Platzierung der Werkstücke können somit sowohl die mechanischen als auch die geometrischen Merkmale des Werkstücks beeinflusst werden.

### 2. Anpassung der zu fertigenden Geometrie

Um den in Abschnitt 5.5.3 beschriebenen Nachteil zu umgehen, dass Werkstücke evtl. außerhalb der Vorgaben konstruiert werden müssen, kann eine Anpassung der zu fertigenden Geometrie auch in der Vorbereitung stattfinden. Bedingt durch die Tatsache, dass in der Vorbereitung jedoch vorwiegend triangulierte Daten vorliegen, können dort einzelne Geometriemerkmale nicht mehr beliebig variiert werden. Durch den Übergang von einem parametrischen Modell (vgl. Abschnitt 5.5.3) auf ein durch Dreiecke angenähertes Modell geht die Assoziativität zwangsläufig verloren. Eine Möglichkeit zur Anpassung der Geometrie triangulierter Daten besteht in der Anwendung der Freiformdeformation (vgl. Abbildung 22). Die Freiformdeformation ist ein Verfahren, bei welchem ein zu deformierendes Objekt (a) in ein das Objekt umgebendes Kontrollgitter eingefügt wird (b) (ESCHEY ET AL. 2011A; HECHLER 2006; LAMOUSIN & WAGGENSPACK 1994; NOBLE 1999; SEDERBERG & PARRY 1986). Während das ursprüngliche Objekt in einem  $x$ - $y$ - $z$ -Koordinatensystem beschrieben wird, wird es durch die Einfügung in ein Kontrollgitter in ein neues Koordinatensystem (hier  $u$ - $v$ - $w$ -Koordinatensystem) überführt. In dem neuen  $u$ - $v$ - $w$ -Koordinatensystem wird das Objekt in den Ursprung verschoben (Translation) und auf die Einheitslänge 1 normiert (Skalierung). Das Kontrollgitter besteht aus einzelnen Kontrollpunkten, welche beliebig verschoben werden können (c). Durch eine Veränderung des Kontrollgitters verändert sich auch das einbezogene zu deformierende Objekt (JACKËL ET AL. 2006). Nach der Auslenkung der Kontrollpunkte wird eine inverse Koordinatentransformation zurück in das  $x$ - $y$ - $z$ -Koordinatensystem vollzogen. Die angepasste Geometrie besitzt danach wieder die gleichen Ko-

ordinaten wie die ursprüngliche Geometrie. Primär kann durch eine Anpassung der Geometrie die Einhaltung der geometrischen Merkmale unterstützt werden.

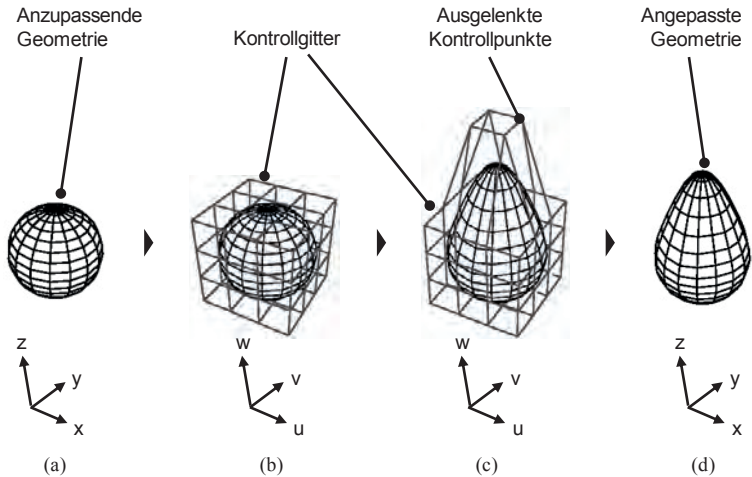


Abbildung 22: Prinzip der Freiformdeformation (in Anlehnung an JACKÈL ET AL. (2006))

### 3. Parametrisierung der Stützstruktur

Stützstrukturen dienen vornehmlich zur Fixierung der Werkstücke, welche sich durch die während der Verfestigung induzierten Eigenspannungen verziehen (MUMTAZ ET AL. 2011). Abhängig von der Werkstückgeometrie, dem Werkstoff und dem Fertigungsverfahren sind geeignete Typen (z. B. Block, Gitter, Linie) und Parameter (z. B. Gitterabstand, Linienbreite, Anbindung zum Werkstück) zur Konfiguration der Stützstrukturen auszuwählen. Eine Berücksichtigung der Maschinencharakteristik kann insofern erfolgen, als dass eine Korrelation zwischen der positionsabhängigen Energieeinbringung und der notwendigen Festigkeit der Stützstrukturen hergestellt wird. Erforderlich hierfür ist eine geeignete Schnittstelle zu dem für die Generierung der Stützstrukturen eingesetzten Werkzeug.

### 4. Anpassung der Fertigungsparameter

Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Maschinencharakteristik in der Vorbereitung besteht zudem in der Anpassung der Fertigungsparameter, wel-

## **5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung**

---

che einem Werkstück zugewiesen werden. Als Fertigungsparameter können hierbei z. B. die für die selektive Verfestigung verwendeten Belichtungsmuster sowie die Strahlparameter angesehen werden. Für die Mehrzahl der am Markt verfügbaren Maschinen ist eine Anpassung der Fertigungsparameter jedoch nur bedingt möglich, da die verwendeten Dateiformate vorwiegend proprietär sind.

### **5.5.5 Direkte Rückführung in den Aufbauprozess**

Der Aufbauprozess additiv gefertigter Werkstücke folgt einem verfahrensspezifischen Ablauf (vgl. Abschnitt 2.2.3.3 ab Seite 14). Umfangreiche Benutzereingriffe in einen laufenden Bauprozess sind nur eingeschränkt möglich und im Sinne einer Serienfertigung zudem nicht zielführend. Die Kontrolle und Steuerung eines Bauprozesses wird von einem Prozessregler übernommen. Der Prozessregler sorgt dafür, dass die zur Erreichung einer bestimmten Werkstückqualität relevanten Prozessgrößen in einem definierten Bereich verbleiben. Das Vorhandensein einer Maschinencharakteristik ist unter anderem darin begründet, dass der Prozessregler sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus technischen Gründen nicht alle systematischen und stochastischen Störgrößen erfassen kann.

Die Berücksichtigung der Maschinencharakteristik würde insofern eine Erweiterung des bestehenden Prozessreglers bedeuten. Merkmale, welche von dem Prozessregler nicht ausgewertet werden können, werden in einer geeigneten formalisierten Art dem Regler wieder zur Verfügung gestellt.

Da die in einer Maschinencharakteristik zusammengefassten Merkmale während des Aufbauprozesses entstehen, ist die Rückführung dieser in den Aufbauprozess als am besten geeignet anzusehen. Eine Kompensation kann so direkt in dem verursachenden Prozessschritt durchgeführt werden. Da es sich bei kommerziell verfügbaren Maschinen bei dem Prozessregler um ein abgeschlossenes System handelt, ist eine Berücksichtigung der Maschinencharakteristik jedoch nur durch den Hersteller möglich.

### **5.5.6 Indirekte Rückführung in bestehende Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit**

Wie in Abbildung 21 auf Seite 68 dargestellt, kann die Maschinencharakteristik sowohl direkt als auch indirekt in die Prozesskette zur additiven Fertigung rückgeführt werden. Bei der indirekten Rückführung erfolgt eine Nutzung der Ma-

schinencharakteristik in Methoden und Vorgängen (vgl. Abschnitt 3.4 ab Seite 40), welche u. a. eine Erhöhung der Prozessfähigkeit anstreben. Dabei wird meist von einem idealisierten Maschinen- und Prozessmodell ausgegangen. Basierend auf der Annahme, dass die für die Untersuchung verwendete Maschine keine Charakteristik aufweist, durch welche sie von einer anderen Maschine signifikant abweichen würde, werden dabei Erkenntnisse entwickelt, welche eine Erhöhung der Qualität additiv gefertigter Werkstücke bewirken sollen.

Bei der Prozessentwicklung (z. B. Identifikation optimierter Prozessparameter) kann eine Berücksichtigung der Maschinencharakteristik beispielsweise dabei unterstützen, Ergebnisse, welche auf einer Referenzmaschine ermittelt wurden, auf weitere Fertigungssysteme zu übertragen. Weiterhin kann durch die Berücksichtigung der Charakteristik der Vorgang der Prozessentwicklung auf unterschiedlichen Referenzmaschinen durchgeführt werden, ohne die Übertragbarkeit der Ergebnisse einzuschränken.

Im Bereich der simulationsbasierten Prozessoptimierung können durch die Berücksichtigung der Maschinencharakteristik die auf dem Zielsystem vorhandenen Gegebenheiten beachtet werden. Bisher werden Simulationen weitgehend unabhängig von den besonderen Merkmalen eines Fertigungssystems durchgeführt. Das für die Simulation verwendete Modell bildet dabei den idealen Prozess ab. Randbedingungen, welche für das Simulationsmodell notwendig sind, werden oftmals ebenfalls als idealisiert angenommen. Die Maschinencharakteristik kann für Simulationen als eine Menge an realen Randbedingungen angesehen werden, welche das Zielsystem beschreiben.

### 5.5.7 Auswahl der geeigneten Rückführung

Die Auswahl der direkten bzw. indirekten Rückführung der Maschinencharakteristik basiert auf den Tätigkeiten und den Möglichkeiten, welche in dem Prozessschritt bzw. in der Methode durchgeführt werden bzw. vorhanden sind.

So ist beispielsweise die Gestaltung des Werkstücks die zentrale Aufgabe der Konstruktion. Eine Einbindung der Maschinencharakteristik zur Verbesserung sowohl der mechanischen als auch der geometrischen Eigenschaften, welche unmittelbar mit der Konstruktion zusammenhängen, ist hier möglich. Die Beeinflussung optischer Eigenschaften in der Konstruktion ist dagegen nur bedingt möglich, da die resultierenden Werte nicht von der konstruktiven Ausgestaltung des Werkstücks abhängen. Die Hauptaufgabe der Vorbereitung ist die Generierung der Fertigungsdaten. Die digitalen Werkstückdaten werden dazu im Bau-

## 5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung

---

raum der Maschine positioniert, orientiert und ggf. mit Stützstrukturen versehen. Die Beeinflussung der mechanischen, geometrischen und optischen Werkstückeigenschaften ist deshalb ausschließlich über diese Parameter möglich. Die Anwendung der Maschinencharakteristik direkt im Aufbauprozess ist zur Verbesserung beliebiger Werkstückeigenschaften möglich. Dies ist darin begründet, dass alle Abweichungen von den Soll-Eigenschaften im Aufbauprozess induziert werden.

Durch das breite Spektrum an bestehenden Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit (vgl. Abschnitt 3.4 ab Seite 40) ist eine pauschale Bewertung bezüglich der Eignung einer indirekten Rückführung nicht zweckmäßig. Stattdessen ist immer eine anwendungsspezifische Beurteilung durchzuführen. So können beispielsweise mittels numerischer Simulation mechanische, geometrische und optische Werkstückeigenschaften das Ziel einer Untersuchung darstellen. Abhängig vom Simulationsmodell ist deshalb zu entscheiden, ob eine Verbesserung ausgewählter Werkstückeigenschaften prinzipiell möglich ist. Analog hierzu muss für die empirische Prozessentwicklung eine anwendungsspezifische Bewertung dahingehend durchgeführt werden, ob bestimmte Eigenschaften beeinflusst werden können.

### 5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Methode vorgestellt, mit welcher eine maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit erreicht werden soll. Der Begriff *Maschinencharakteristik* wurde einführend als die Summe aller Merkmale definiert, durch welche ein Fertigungssystem von einem anderen Fertigungssystem unterschieden werden kann.

Anschließend wurde die Erfassung der Maschinencharakteristik als erster Schritt zur Erhöhung der Prozessfähigkeit erläutert. Die Erfassung kann untergliedert werden in die Beobachtung und die Formalisierung. Aus den Flussarten *Stoff*, *Signal* und *Wissen* können durch Beobachtungen Merkmale extrahiert werden, welche einen Rückschluss auf das Fertigungssystem erlauben. Aufgrund der unterschiedlichen Arten der Merkmale ist eine Formalisierung notwendig, durch welche eine einheitliche Form der Merkmale erlangt werden kann. Es wurden hierfür die sprachliche, die regelbasierte und die mathematische Formalisierung vorgestellt.



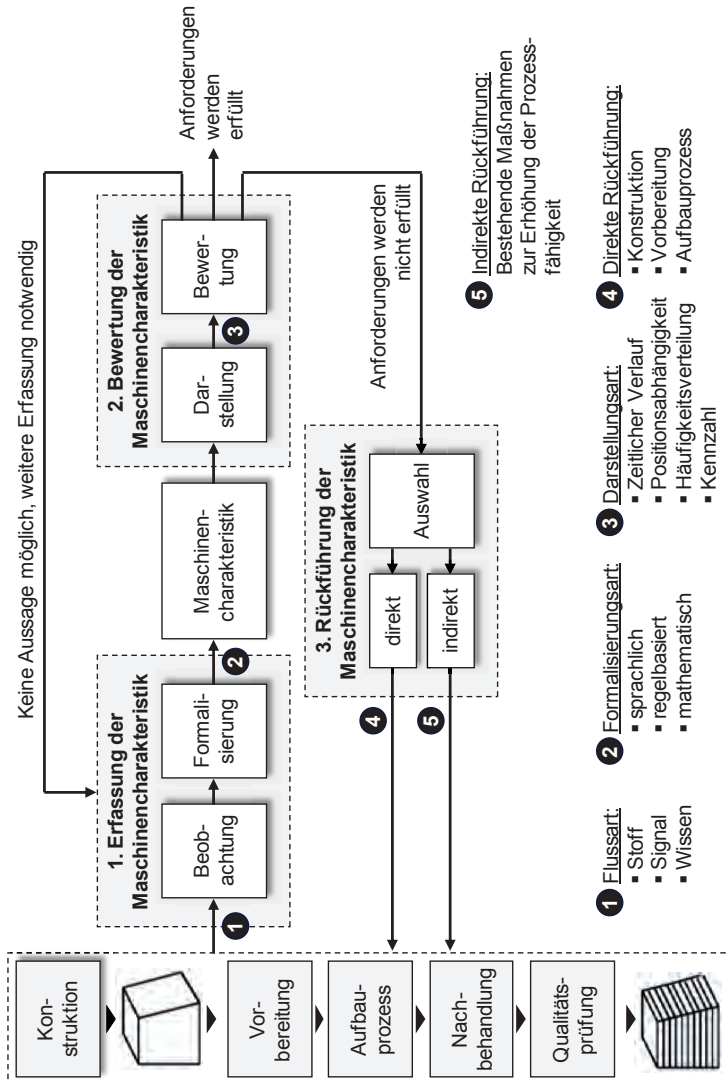


Abbildung 23: Übersicht über die Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit

## **5 Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung**

---

In einem zweiten Schritt ist eine Bewertung der Maschinencharakteristik notwendig. Um dem Anwender eine Entscheidung bezüglich der Auswirkungen der Maschinencharakteristik zu ermöglichen, ist eine geeignete Darstellungsart notwendig. Hierfür wurden vier Alternativen vorgeschlagen. Basierend auf der Darstellung soll ein Anwender die Auswirkungen der Maschinencharakteristik bewerten. Bedingt durch die Maschinencharakteristik kann es der Fall sein, dass

1. die Anforderungen an ein Werkstück eingehalten werden können,
2. nicht eingehalten werden können oder
3. keine Aussage möglich ist, da die Maschinencharakteristik noch nicht detailliert genug erfasst wurde.

Abhängig vom Ergebnis der Bewertung kann in einem dritten Schritt eine direkte oder indirekte Rückführung erfolgen. Die direkte Rückführung ermöglicht die Nutzung der Maschinencharakteristik in den Prozessschritten Konstruktion, Vorbereitung und/oder Aufbauprozess. Durch die indirekte Rückführung können bestehende Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit in die Lage versetzt werden, das Verhalten eines Fertigungssystems zu berücksichtigen.

Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterte Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit ist in Abbildung 23 zusammenfassend dargestellt.

## **6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns**

### **6.1 Vorgehen im Kapitel**

Das Ziel dieser Arbeit ist eine maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit für die additive Fertigung. Es soll dadurch allgemein der Fähigkeitsbegriff für die additive Fertigung etabliert werden, um die von den Anwendern oftmals unklar definierten Anforderungen zu objektivieren und die Möglichkeit ihrer Erreichung zu bewerten. Die Erhöhung soll maschinenspezifisch durchgeführt werden, um das individuelle charakteristische Verhalten einer einzelnen Maschine berücksichtigen zu können. Dieses wird bei bestehenden Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit (vgl. Abschnitt 3.4 ab Seite 40) häufig nicht betrachtet.

Die Anwendung der Methode soll nachfolgend am Beispiel des additiven Verfahrens *Lasersintern* beschrieben werden. Nach WOHLERS (2010) weist diese Technologie die höchste prognostizierte Wachstumsrate unter allen untersuchten Verfahren auf.

Einleitend werden das untersuchte System vorgestellt und die derzeit vorherrschenden Defizite diskutiert. Um die Maschinencharakteristik qualitativ aufzuzeigen, wurde für das System eine thermische Analyse durchgeführt. Die quantitative Erfassung der Maschinencharakteristik wurde durch die Ermittlung der positionsabhängigen Schwindung vorgenommen. Die beobachteten und formalisierten Merkmale wurden weiterführend bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Prozessfähigkeit hin bewertet. Zur Erhöhung der Prozessfähigkeit des untersuchten Systems erfolgte abschließend eine exemplarische Rückführung der Maschinencharakteristik. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Prozessfähigkeit mit und ohne Rückführung der Maschinencharakteristik.

### **6.2 Vorstellung des untersuchten Systems**

Beim Lasersintern handelt es sich um einen additiven Fertigungsprozess (wie in Abschnitt 2.2.3 ab Seite 11 beschrieben) zur Verarbeitung von teilkristallinen Thermoplasten bei einer Temperatur von ca. 170 °C. Der Prozessablauf setzt sich aus der Aufheizphase, der Bauphase und der Abkühlphase zusammen. Für die



Im Gegensatz zu Strahlschmelzverfahren kann der verfügbare Bauraum nahezu vollständig ausgenutzt werden, da keine Stützstrukturen benötigt werden. Lediglich zur Sicherstellung einer weitgehend homogenen Abkühlung im gesamten Bauraum (KADDAR 2010) sind in Aufbaurichtung ( $z$ ) eine Startschicht sowie eine Deckschicht mit jeweils 4 mm Höhe notwendig (EOS 2008). Zudem wird der verfügbare Bauraum um die für die Kompensation der Schwindung verwendete Skalierung eingeschränkt.

Für alle nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurde der Werkstoff PA 2200 mit einer Schichtdicke von 0,1 mm und einem Standardparametersatz verarbeitet (EOS 2008) (vgl. Tabelle 20 im Anhang unter Abschnitt 10.6). Die Vorbereitung des Werkstoffs erfolgte nach Herstellerangaben. PA 2200 ist die Herstellerbezeichnung eines auf Polyamid 12 (PA 12) basierenden Materials. Die Kennzeichnung des Ausgangsstoffs PA 12 erfolgt durch eine Zahl, welche die Anzahl aller C-Atome im Ausgangsstoff angibt (KAISER 2006). Bedingt durch das Produktionsverfahren weist PA 2200 im Vergleich zum PA 12 eine höhere Kristallinität und einen höheren Schmelzpunkt auf (EOS 2012). Die Dichte von PA 2200 liegt mit  $0,93 \text{ g/cm}^3$  unter der von reinem PA 12 mit  $1,01 \text{ g/cm}^3$  (EOS 2012; KAISER 2006). Zudem enthält PA 2200 weitere Zusätze. In der Branche ist es üblich, dass eine Maschine nur mit dem Werkstoff betrieben wird, welcher vom Maschinenhersteller qualifiziert wurde und über diesen bezogen werden kann. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs stellt Kern-Know-how des Maschinenherstellers dar und wurde bisher nicht veröffentlicht. Die Nachvollziehbarkeit der Ausführungen im Rahmen dieser Arbeit ist gewährleistet, da der Werkstoff PA 2200 über den Hersteller EOS GmbH Electro Optical Systems zu einem Preis von derzeit 56,00 €/kg bezogen werden kann.

Sofern bei den weiteren Untersuchungen nicht anders angegeben, wurden die bei der Inbetriebnahme des Systems ermittelten Werte zur Schwindungskompensation bzw. zur Strahlkompensation verwendet:

- Kompensation der  $x$ -Schwindung:  $s_x = 3,20 \%$
- Kompensation der  $y$ -Schwindung:  $s_y = 3,16 \%$
- Kompensation der  $z$ -Schwindung:
  - $Z0 = 2,20 \%$
  - $Z300 = 1,60 \%$
- Strahlkompensation:  $d_{B0} = 0,321 \text{ mm}$

Die Notation der Faktoren orientiert sich an der vom Anlagenhersteller verwendeten Schreibweise. In  $x$ - und  $y$ -Richtung erfolgt eine gleichmäßige und positionsunabhängige Skalierung der digitalen Werkstückdaten um die Faktoren  $s_x$

und  $s_y$  nach Gleichung (8) (vgl. Seite 32). Entlang der z-Achse wird eine lineare Interpolation durchgeführt, welche durch die Faktoren  $Z_0$  und  $Z_{300}$  definiert ist. Der Faktor  $Z_0$  bezeichnet hierbei den Skalierungsfaktor, welcher bei der Position  $Z = 0 \text{ mm}$  gilt. Der Faktor  $Z_{300}$  gilt entsprechend bei  $Z = 300 \text{ mm}$ . Der Schwindungsausgleich in z-Richtung erfolgt nicht über eine Skalierung der digitalen Werkstückdaten, sondern durch eine Erhöhung der Schichtdicke. Dies bedeutet, dass die Bauplatte um einen um die Schwindung erhöhten Wert abgesenkt wird.

### 6.3 Voruntersuchungen zum Wärmehaushalt

Vor der Erfassung der Charakteristik des untersuchten Systems wurde einleitend eine thermische Analyse durchgeführt. Für das Lasersintern ist bekannt, dass die Temperaturführung des Prozesses und die Homogenität der Wärmeverteilung einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Werkstücke haben.

Wie in Abschnitt 5.2 ab Seite 56 beschrieben, kann die Charakteristik eines Fertigungssystems immer nur durch einen Bezug auf ein Referenzsystem ausgedrückt werden. Für die Voruntersuchungen zum Wärmehaushalt des untersuchten Systems wurde als Referenzsystem ein theoretisches, idealisiertes Maschinenmodell desselben Typs herangezogen. Bei diesem wird davon ausgegangen, dass keine Regelfehler auftreten und der vorgegebene Temperaturverlauf in der Aufheizphase, der Bauphase und der Abkühlphase unter allen Umständen eingehalten wird. Die Unterschiede zwischen dem untersuchten System und dem Referenzsystem entsprechen somit der Maschinencharakteristik des untersuchten Systems. Abbildung 25 zeigt eine thermografische Aufnahme der in der Prozesskammer verwendeten Heizung, ca. 5 Minuten nach dem Start einer regulären Aufheizphase (vgl. auch Abbildung 24 auf Seite 80, oberer Heizstrahler). In der Abbildung ist die Heizfläche und die projizierte Begrenzung der Baufläche dargestellt. Die Heizfläche ist in der Mitte durch eine Öffnung unterbrochen, durch welche der zur Schichtverfestigung eingesetzte Laserstrahl geführt werden kann. Dadurch ist es möglich, das Ausgangsmaterial aus der selben Richtung zu temperieren und zu verfestigen. Um die Abstrahlverluste zu reduzieren, weist die Heizung eine isolierende Umrandung auf.

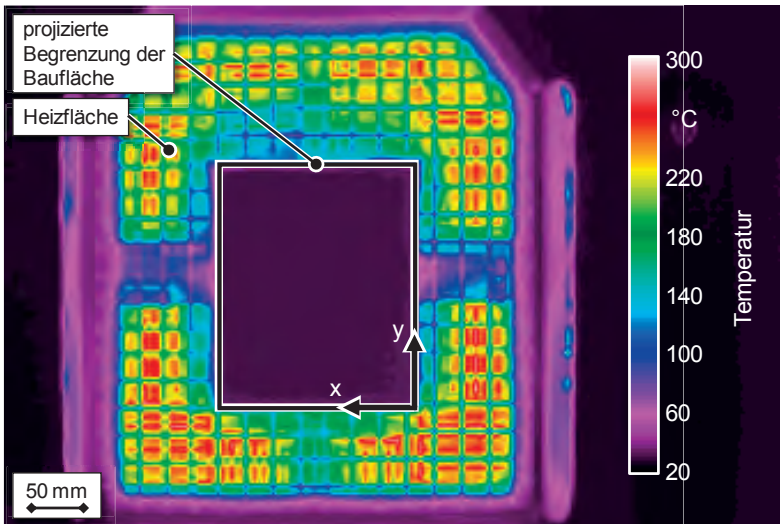


Abbildung 25: Thermografische Aufnahme der Widerstandsstrahlungsheizung

An der Temperaturverteilung der Heizfläche ist zu erkennen, dass es aufgrund der konstruktiven Gestaltung der Heizung zu lokal ausgeprägten Temperaturunterschieden kommt. Die von der Heizung auf das Pulver abgestrahlte Wärme ist somit als nicht gleichmäßig anzusehen, sondern sie weist eine Positionsabhängigkeit auf. Durch die geringe thermische Leitfähigkeit des Werkstoffs von  $0,127 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  werden die durch die Flächenheizung verursachten Temperaturdifferenzen im Pulverbett nur langsam ausgeglichen. Abbildung 26 zeigt die Temperaturverteilung auf der Baufläche, auf welcher das Pulver selektiv verfestigt wird.

Es ist eine Temperaturzunahme entlang der  $y$ -Achse ersichtlich. Eine Ursache für die niedrigere Temperatur im vorderen Teil des Bildes ist die geringere Dämmung an der Türöffnung, durch die ein erhöhter Wärmeabfluss erfolgt. Abbildung 27 zeigt eine thermografische Aufnahme der Entnahmekammer.

Es sind hohe lokale Temperaturunterschiede innerhalb der Entnahmekammer zu erkennen. Das System besitzt zwei Ventilatoren, welche die temperierte Luft verteilen. Durch Öffnungen hinter dem Baubehälter strömt nicht temperierter Stickstoff (Inertgas) in die Entnahmekammer, welcher eine Temperaturabnahme am Baubehälter hervorruft.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

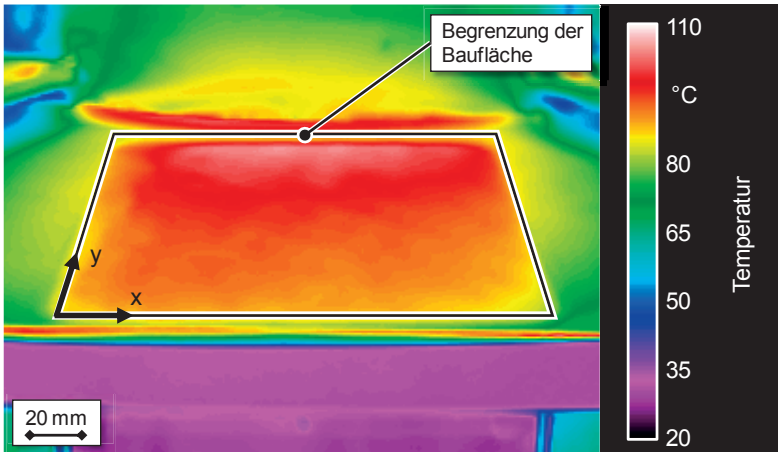


Abbildung 26: Thermografische Aufnahme des Baufelds bei aktivierter Prozesskammerheizung

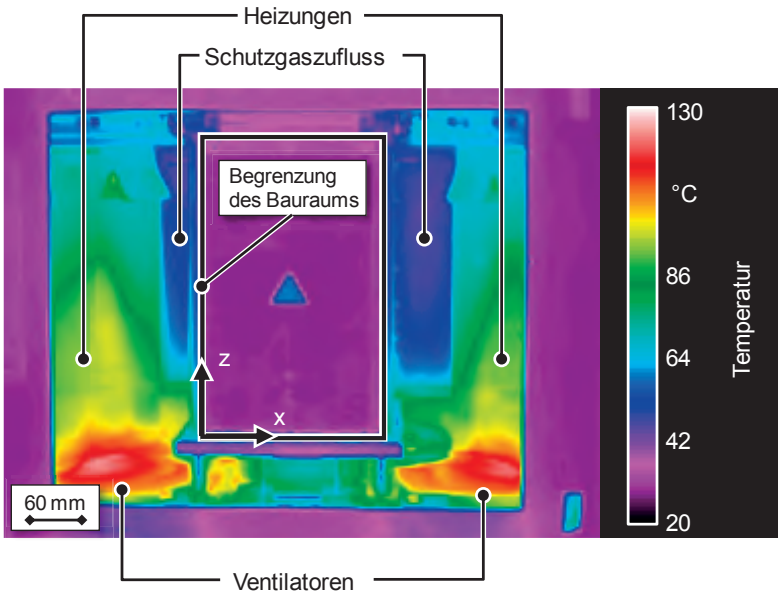


Abbildung 27: Thermografische Aufnahme der Entnahmekammer



Die bisherigen Untersuchungen zeigen die Temperaturverteilungen außerhalb des eigentlichen Baufelds bzw. aufgrund von beschränkten Zugriffsmöglichkeiten außerhalb der für den Prozess notwendigen Bedingungen (Aufheizdauer, Temperatur). So liefert die inhomogene Temperaturverteilung der Heizung (vgl. Abbildung 25) nur ein Indiz für eine Maschinencharakteristik des untersuchten Systems, da die tatsächlichen Auswirkungen dieser Temperaturunterschiede auf die Werkstücke nicht bekannt sind. Ferner besteht durch die thermografische Aufnahme des Baufelds bei aktivierter Prozesskammerheizung (vgl. Abbildung 26) nur eine Einzelmessung während der Aufheizphase, welche nicht die Bedingungen während eines gesamten Bauprozesses darstellen kann. Zur Bewertung der Homogenität der Temperaturverteilung im Pulverbett war deshalb eine direkte Messung notwendig. Durch diese sollte geklärt werden, ob eine inhomogene Temperaturverteilung im Pulverbett auch während des Bauprozesses besteht oder ob durch Wärmeströme ein Ausgleich stattfindet. Abbildung 28 stellt den Versuchsaufbau dar, mit welchem durch 15 gleichmäßig über der Baufläche angeordneten Thermoelemente die Temperatur während eines Prozessablaufs aufgezeichnet wurde.

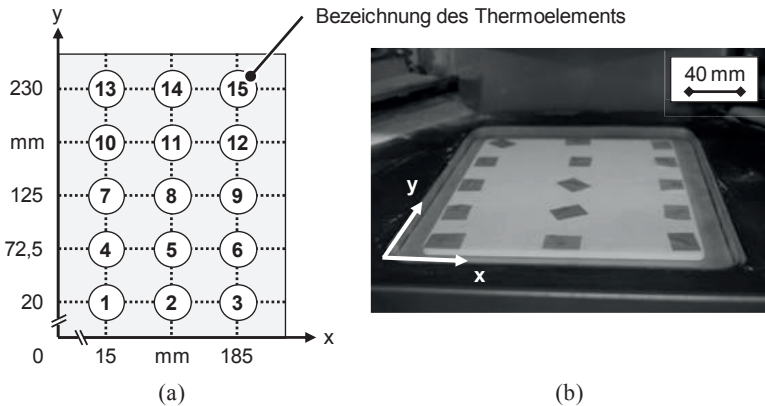


Abbildung 28: Versuchsaufbau zur Messung der Temperaturverteilung im Pulverbett, (a) schematische Darstellung, (b) fotografische Aufnahme

Durch den Versuchsaufbau konnte die Temperatur an der untersten Schicht gemessen werden. Zu Beginn der Messung waren die Thermoelemente nur geringfügig mit Pulver bedeckt. Mit zunehmendem Baufortschritt vergrößerte sich der Abstand zwischen Messposition und Heizung. Abbildung 29 zeigt exemplarisch

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

den gemessenen Temperaturverlauf an der Messstelle 8, d. h. in der Mitte des Baufelds über einen gesamten Bauprozess hinweg.

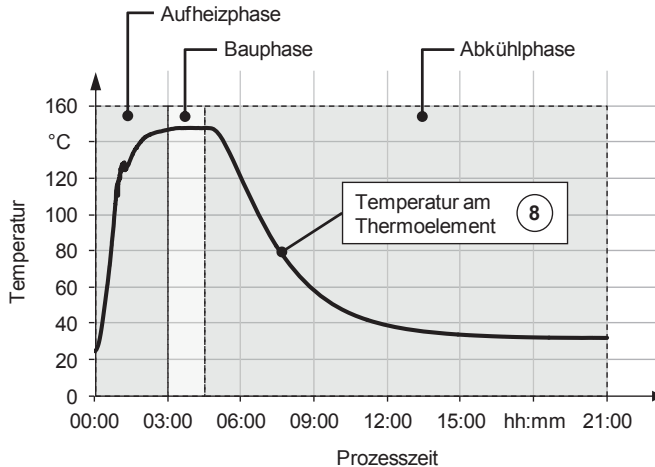


Abbildung 29: Temperaturverlauf an Messstelle 8

In der Abbildung ist die Aufheizphase zu erkennen, in welcher das System innerhalb der Zeit  $t_{HU} = 3\text{ h}$  von Raumtemperatur auf die Prozesstemperatur aufgeheizt wurde (engl. heating-up). Es schließt sich die Bauphase von  $t_B = 1,5\text{ h}$  Dauer an (engl. build). Abschließend folgt die Abkühlphase ( $t_{CD}$ ), welche bei einer Temperatur nahe der Raumtemperatur beendet wurde (engl. cool-down). Abbildung 30 zeigt die gemessenen Temperaturen jeweils in den Ecken der Baufläche (Messstellen 1, 3, 13, 15) sowie in der Mitte des Baufeldes (Messstelle 8) während der Bauphase.

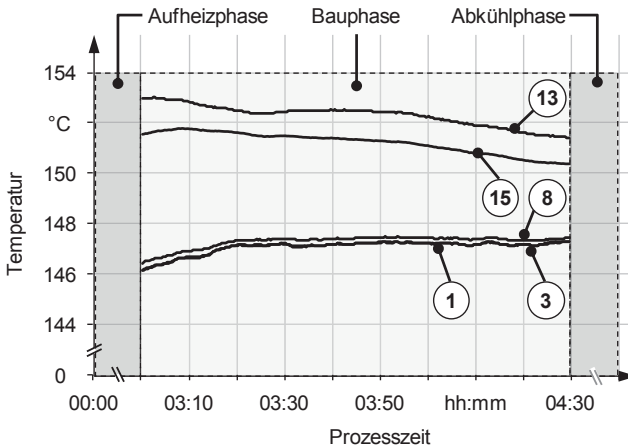


Abbildung 30: Temperaturverläufe während der Bauphase an den Messstellen 1, 3, 8, 13 und 15

Wie aus Abbildung 30 zu entnehmen ist, bestehen im Baufeld auch während der Bauphase Temperaturunterschiede von mehr als  $2\text{ K}$  zwischen den untersuchten Messstellen. Die Messungen an den Messstellen 13 und 15 weisen höhere Werte als in der Mitte des Baufeldes auf. Zudem treten an den Messstellen 1 und 3 (weitgehend identisch) geringere Temperaturen als in der Mitte des Baufeldes auf. Mit zunehmendem Baufortschritt kommt es zu einer geringfügigen Abnahme der Temperaturdifferenzen, welche mit steigender Entfernung von der Flächenheizung und durch die Wärmeleitung im Pulverbett abgebaut werden. Die in obiger Darstellung nicht enthaltenen Temperaturverläufe (d. h. Messstellen 2, 4-7, 9-12, 14) befanden sich zwischen den oben dargestellten Signalen. Die Messungen wiesen eine Ähnlichkeit mit der in Abbildung 26 (Seite 84) dargestellten Temperaturverteilung auf.

Bezogen auf ein idealisiertes Fertigungssystem, bei welchem von einer vollständig homogenen Temperaturverteilung ausgegangen wird, besitzt das untersuchte System eine ausgeprägte thermische Charakteristik. Die Erfassung, Bewertung und Rückführung der Maschinencharakteristik soll deshalb nachfolgend exemplarisch beschrieben werden.

### 6.4 Erfassung und Bewertung der Maschinencharakteristik

#### 6.4.1 Allgemeines

Schwindungseffekte führen zu einer gewichtigen Gestaltabweichung bei lasergesinterten Werkstücken (PACURAR ET AL. 2009). Da zu deren Verwendung primär Maßtoleranzen eingehalten werden müssen, wirken sich die Abweichungen negativ auf die Anwendbarkeit des Verfahrens aus. Wie in Abschnitt 3.2.3 ab Seite 30 beschrieben wurde, besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Temperaturverteilung im Bauraum sowie der daraus resultierenden Schwindung. Dieser Zusammenhang ist derzeit jedoch nicht in vollem Umfang, sondern nur qualitativ bekannt. Die quantitative Erfassung der Schwindung und ihrer Verteilung anhand von Probekörpern ist somit als zweckmäßiger zu betrachten, als dies von der Temperaturverteilung im Bauraum abzuleiten. Die im vorhergehenden Abschnitt durchgeführten thermischen Untersuchungen dienen nun der Überprüfung der Plausibilität der quantitativ ermittelten Schwindung. Abbildung 31 stellt das Vorgehen zur Bestimmung der Schwindung an Probekörpern dar.



Abbildung 31: Vorgehen zur Bestimmung der Schwindung an Probekörpern

Um die Messung durchführen zu können, waren Probekörper erforderlich, die so gestaltet sein mussten, dass die positionsabhängige Schwindung erfasst werden konnte. Die zu erreichende Ortsauflösung sollte dabei maximal sein, wobei der Maximalwert von der Vorgabe begrenzt wurde, dass die auftretenden Effekte aufgrund der begrenzten Prüfmittelfähigkeit vermessen werden können mussten. Die Probekörper wurden anschließend im virtuellen Bauraum des Fertigungssystems positioniert und orientiert. Nach der Herstellung der Probekörper mussten diese abschließend noch vermessen werden, um eine quantitative Ermittlung der Schwindung zu erreichen.

#### 6.4.2 Nachweis der Prüfmittelfähigkeit

Zur Erfassung der aus den Schwindungseffekten resultierenden Maße der Probekörper wurde ein Höhenmessgerät vom Typ Hi\_Cal 300 verwendet (SYLVAC SA 2007). Das Gerät arbeitet nach der taktilen Messmethode und erfasst die Koordinate in nur einer Richtung. Für das Höhenmessgerät wurde gemäß Abschnitt

2.3.3 auf Seite 17 der Nachweis der Prüfmittelfähigkeit erbracht. Dabei wurde die minimale Abweichung  $A_{min}$  ermittelt, welche nach Verfahren 1 und Verfahren 2 gerade noch prozesssicher erfasst werden kann (vgl. Abbildung 55 und Abbildung 56 im Anhang unter Abschnitt 10.2). Es ergaben sich dabei folgende Werte:

- Verfahren 1:  $A_{min,1} = 0,073 \text{ mm}$
- Verfahren 2:  $A_{min,2} = 0,433 \text{ mm}$

Der Wert  $A_{min,1}$  bedeutet, dass in der Prüfungsumgebung mit dem Höhenmessgerät Hi\_Cal 300 an einem Längennormal nur Abweichungen prozesssicher erfasst werden konnten, welche über dem Wert von  $0,073 \text{ mm}$  lagen. Unterhalb dieses Wertes konnten die Ursachen für Abweichungen nicht sicher festgestellt werden. Der Wert  $A_{min,2}$  durch das Verfahren 2 berücksichtigte zusätzlich die Beschaffenheit der mittels Lasersintern gefertigten Werkstücke. Vorwiegend aufgrund der Oberflächenrauheit waren hierbei nur Abweichungen prozesssicher zu identifizieren, welche über dem Wert von  $0,433 \text{ mm}$  lagen.

In Tabelle 4 sind die Bereiche der Allgmeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) dargestellt, welche durch das untersuchte Höhenmessgerät und die mittels Lasersintern gefertigten Probekörper nach der Prüfmittelfähigkeit vermessen werden konnten.

Die Tabelle zeigt, dass unter den gegebenen Randbedingungen die Einhaltung der Toleranzklasse *fein* nur für Nennmaße über  $1000 \text{ mm}$  und die Toleranzklasse *grob* bereits für Nennmaße über  $6 \text{ mm}$  prozesssicher nachgewiesen werden konnte.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

Tabelle 4: Klassifizierung der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) in Bereiche, welche nach Verfahren 1 und Verfahren 2 der Prüfmittelfähigkeitsuntersuchung für das Höhenmessgerät Hi\_Cal 300 und mittels Lasersintern gefertigte Werkstücke als fähig und nicht fähig bezeichnet werden müssen

Toleranz- klasse	Grenzabmaße für Nennmaßbereiche							
	≥ 0,5	≥ 3	≥ 6	≥ 30	≥ 120	≥ 400	≥ 1000	≥ 2000
	< 3	< 6	< 30	< 120	< 400	< 1000	< 2000	< 4000
<b>fein</b>	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
<b>mittel</b>	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
<b>grob</b>	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
<b>sehr grob</b>	-	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

Legende:

(alle Werte in mm)



Bereiche der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b), welche mit dem Höhenmessgerät Hi\_Cal 300 und für mittels Lasersintern gefertigte Werkstücke nur nach Verfahren 1 prozesssicher vermessen werden können;



Bereiche der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b), welche mit dem Höhenmessgerät Hi\_Cal 300 und für mittels Lasersintern gefertigte Werkstücke nur nach Verfahren 2 prozesssicher vermessen werden können;



Bereiche der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b), welche mit dem Höhenmessgerät Hi\_Cal 300 und für mittels Lasersintern gefertigte Werkstücke prozesssicher vermessen werden können;

An dieser Stelle sollen zwei Aspekte besonders erwähnt werden, weil diese für das weitere Verständnis von besonderer Wichtigkeit sind. Erstens besitzt das verwendete Messgerät laut Kalibrierschein eine maximale Abweichung von 1,5 µm sowie mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % eine Messunsicherheit von ±1,2 µm. Bedingt durch die Rauheit der Probekörper, die Messbedingungen sowie den Einfluss des Bedieners ist es jedoch nicht möglich, diese Fähigkeit vollständig zu nutzen. Der Unterschied zwischen den vom Messgerätehersteller

angegebenen Grenzen und der ermittelten minimalen Abweichung  $A_{min,2}$  weist auf die Notwendigkeit des Nachweises der Prüfmittelfähigkeit für einen bestimmten Anwendungsfall hin. Zum zweiten ist die minimale Abweichung  $A_{min,2}$  nicht als eine strenge Grenze zu interpretieren, unterhalb derer pauschal keine Abweichungen erfasst werden können. Vielmehr steigt mit zunehmender Unterschreitung von  $A_{min,2}$  die Wahrscheinlichkeit für Messfehler. Entsprechende Messungen unterhalb der Prüfmittelfähigkeit sind daher als solche kenntlich zu machen.

### 6.4.3 Schwindung in x-Richtung

Die von BRAJLIH ET AL. (2006), DAO ET AL. (1999), MAHESH ET AL. (2004), SENTHILKUMARAN ET AL. (2009), SHEN ET AL. (2000), TANG ET AL. (2004), PACURAR ET AL. (2009), PACURAR ET AL. (2010), WANG (1999) oder ZHOU ET AL. (2000) bereits entwickelten Probekörper sind entweder nicht für das Lasersintern konzipiert oder erlauben keine positionsabhängige Ermittlung der Schwindungswerte. Die Schwindung entlang der  $x$ -Achse ( $x$ -Schwindung) erfolgt prozessbedingt zur Mitte der Baufläche hin. Abbildung 32 stellt schematisch den zur Erfassung der positionsabhängigen Schwindung realisierten Probekörper dar. Die vollständige technische Zeichnung kann der Abbildung 53 im Anhang unter Abschnitt 10.1 entnommen werden.

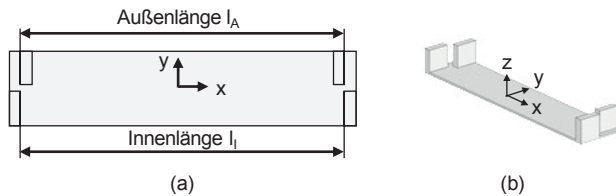


Abbildung 32: Probekörper zur Erfassung der  $x$ -Schwindung

Zur Erfassung der Schwindung wurde die Gleichung (10) verwendet, welche auf Gleichung (5) (vgl. Seite 30) basiert:

$$s_x = \frac{l_{A,Soll}}{\frac{1}{2} \cdot (l_{A,Ist} + l_{I,Ist})} - 1 \quad (10)$$

Der Probekörper war so gestaltet, dass ein Fehler in der Strahlkompensation, d. h. ein Fehler durch einen ungeeigneten Wert für die Verschiebung der Spur des Energieeintrags in das Innere einer zu verfestigenden Fläche (vgl. Abbildung 13 auf Seite 31), aus der Messung eliminiert werden konnte. Hierfür wird

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

---

der Mittelwert aus zwei gleichen Längen  $l_A$  und  $l_I$  errechnet, bei welchen die Strahlkompensation mit unterschiedlichen Vorzeichen wirkt und sich dadurch aufhebt. Die Längen  $l_A$  und  $l_I$  waren so dimensioniert, dass bei einer angenommenen Streuung der Schwindung  $s_x$  um  $\pm 0,5\%$  um den angegebenen Standardwert die Prüfmittelfähigkeit gerade noch einzuhalten war (vgl. Formel (11) und Formel (12)). Es gilt also:

$$\frac{l_A}{l_A \pm A_{min,2}} - 1 = \pm 0,5\% \quad (11)$$

$$l_A = l_I = \pm A_{min,2} \cdot \frac{1 \pm 0,5\%}{\pm 0,5\%} \approx \pm 0,433 \text{ mm} \cdot \pm 200 \approx 87 \text{ mm} \quad (12)$$

Eine Länge von  $87 \text{ mm}$  bedeutet, dass der Probekörper aufgrund seiner Beschaffenheit (z. B. Oberflächenrauheit) prozesssicher vermessen werden kann, wenn der Wert der tatsächlichen  $x$ -Schwindung um mehr als  $0,5\%$  um den angegebenen Standardwert von  $3,20\%$  streut. Befindet sich der Wert der tatsächlichen Schwindung im Intervall  $\pm 0,5\%$ , so kann die Prüfmittelfähigkeit nicht mehr prozesssicher eingehalten werden. Wie vorstehend beschrieben, steigt mit zunehmender Unterschreitung von  $A_{min,2}$  die Wahrscheinlichkeit für Messfehler. Es kann dann nicht mehr sicher festgestellt werden, ob die gemessene Länge alleine auf die Schwindung zurückgeführt werden kann. Im Sinne der Einhaltung der Prüfmittelfähigkeit wäre ein höherer Wert von  $l_A$  und  $l_I$  vorteilhaft, da somit auch geringere Streuungen des Schwindungswerts nachgewiesen werden könnten. Durch die begrenzt verfügbare Baufläche musste hier jedoch ein Kompromiss zwischen der vorhandenen Messgenauigkeit und der örtlichen Auflösung der Schwindung gefunden werden. Durch die Wahl von  $l_A = l_I = 87 \text{ mm}$  war es möglich, in  $x$ -Richtung zwei Schwindungswerte zu erfassen. Abbildung 33 zeigt die gewählte Positionierung und Orientierung der Probekörper im virtuellen Bauraum des untersuchten Systems. Zur Erfassung der Schwindung in  $x$ -Richtung wurden insgesamt 72 Probekörper an unterschiedlichen Positionen im Bauraum regelmäßig angeordnet. Abbildung 34 verdeutlicht die um die Auswirkungen einer fehlerhaften Strahlkompensation bereinigte Länge  $l_{AI} = 0,5 \cdot (l_A + l_I)$  für die Probekörper bei  $Z = 10 \text{ mm}$ . Die Werte aller Probekörper können Tabelle 14 im Anhang unter Abschnitt 10.3 entnommen werden. Die Abbildung zeigt das gewählte Nennmaß der Probekörper von  $87,0 \text{ mm}$ , die Bereiche, welche durch die Prüfmittelfähigkeit eingehalten bzw. nicht eingehalten werden sowie die gemittelten Längen  $l_{AI}$  der einzelnen Probekörper. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte eine nur geringe Streuung um das Nennmaß aufwiesen. Dabei trat kein Wert aus dem Bereich heraus, welcher aufgrund der Prüfmittelfähigkeit nicht prozesssicher vermessen werden kann.



## 6.4 Erfassung und Bewertung der Maschinencharakteristik

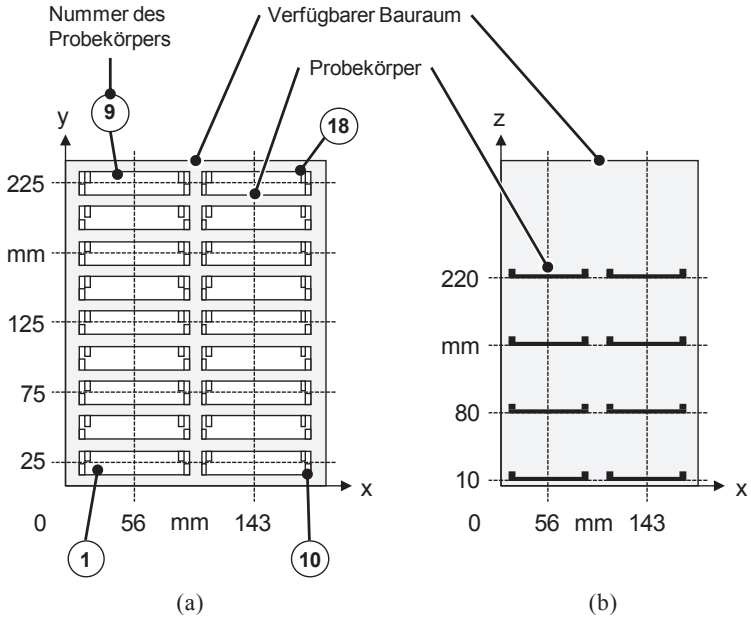


Abbildung 33: Platzierung der Probekörper zur Erfassung der x-Schwindigkeit, (a) Ansicht von oben, (b) Ansicht von vorne

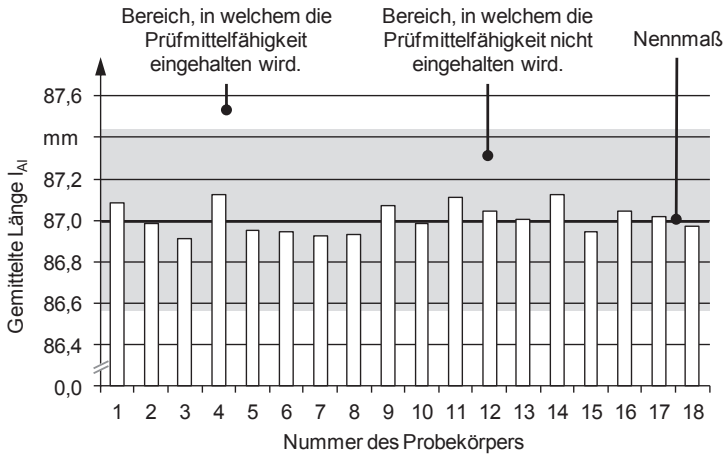


Abbildung 34: Gemessene Längen der Probekörper zur Erfassung der x-Schwindigkeit bei  $Z = 10$  mm

### 6.4.4 Schwindung in $y$ -Richtung

Die Schwindung in Richtung der  $y$ -Achse ( $y$ -Schwindung) kann mit den selben Probekörpern wie die  $x$ -Schwindung erfasst werden. Die Probekörper sind dazu lediglich mit ihrer Hauptabmessung entlang der  $y$ -Achse zu orientieren. Zur Erfassung der Schwindungswerte wurde das zu untersuchende System mit insgesamt 44 Probekörpern bestückt, deren Positionen in Abbildung 35 zu sehen sind.

Wie in der Auswertung der Probekörper für die  $x$ -Schwindung wurde die um die Auswirkungen einer fehlerhaften Strahlkompensation bereinigte Länge  $l_{AI}$  für jeden Probekörper ermittelt. Abbildung 36 stellt diese für  $Z = 10 \text{ mm}$  dar. Die Werte aller Probekörper können Tabelle 15 im Anhang unter Abschnitt 10.4 entnommen werden.

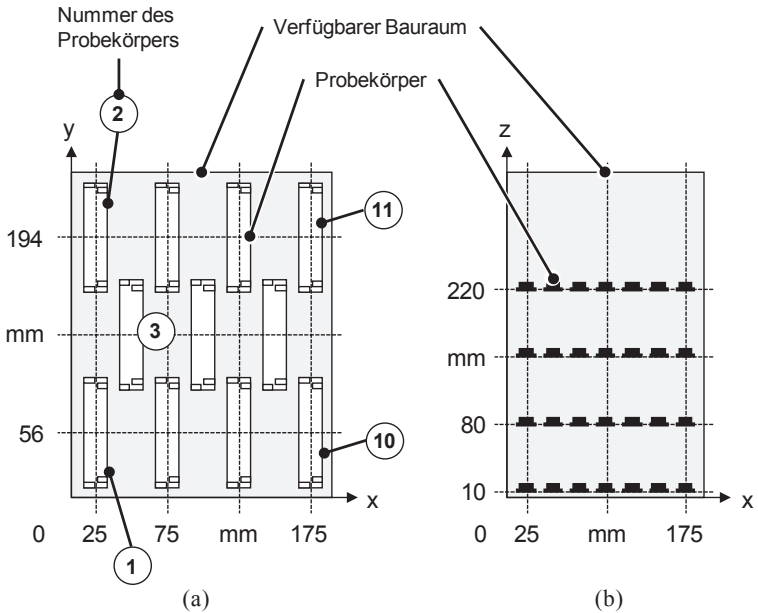


Abbildung 35: Platzierung der Probekörper zur Erfassung der  $y$ -Schwindung, (a) Ansicht von oben, (b) Ansicht von vorne

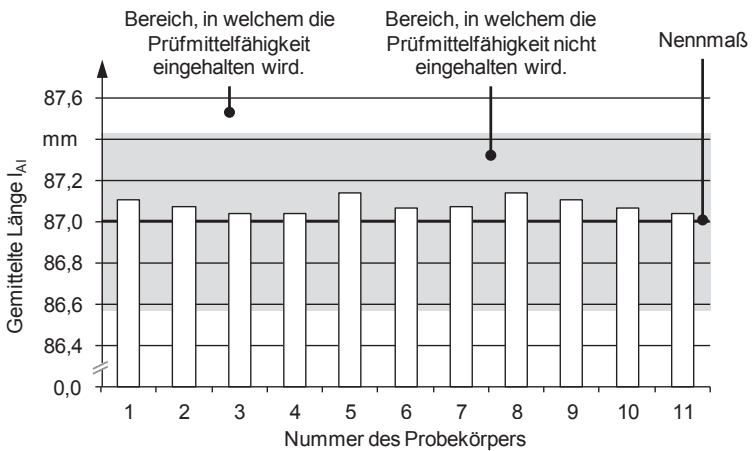


Abbildung 36: Gemessene Längen der Probekörper zur Erfassung der  $y$ -Schwindung bei  $Z = 10$  mm

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

Vergleichbar zur  $x$ -Schwindung konnten auch bei der Erfassung der  $y$ -Schwindung keine Werte gemessen werden, welche in dem Bereich liegen, in welchem die Prüfmittelfähigkeit eingehalten wird. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Werte aller gemittelten Längen über dem Sollwert liegen, was auf einen nicht optimal justierten Wert für die Schwindungskompensation zurückgeführt werden kann. Es konnte zusätzlich eine Positionsabhängigkeit in der Schwindungsverteilung festgestellt werden, welche in Abbildung 37 dargestellt ist.

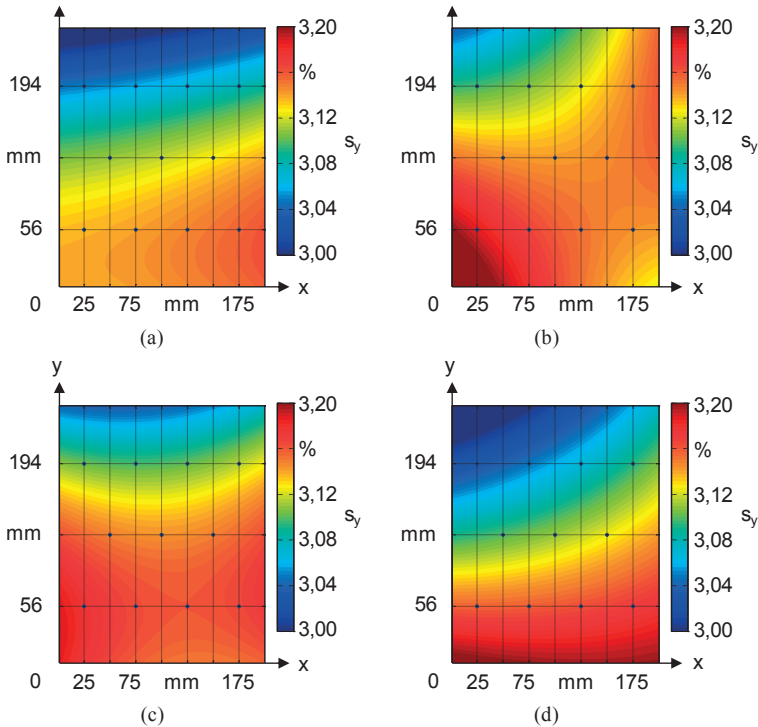


Abbildung 37: Positionsabhängigkeit der  $y$ -Schwindung für unterschiedliche  $z$ -Positionen, (a)  $Z=10$  mm, (b)  $Z=80$  mm, (c)  $Z=150$  mm, (d)  $Z=220$  mm

Hierbei wurde für jede der vier  $z$ -Positionen eine Regressionsanalyse durchgeführt, bei welcher die abhängige Variable  $s_y$  als Funktion der unabhängigen Variablen  $x$ -Position,  $y$ -Position und der Schwindung an der Position so bestimmt wird, dass der Fehler zwischen der Regressionsfunktion und den einzelnen Messwerten minimiert wird (sog. curve fitting). Die Berechnung erfolgte mit

dem Programm MATLAB®. Der Wert der Regressionsfunktion an einer bestimmten Position wird in Abbildung 37 mittels einer Farbkodierung dargestellt. Es ist eine prinzipielle Übereinstimmung mit der thermografischen Aufnahme des Baufelds bei aktivierter Widerstandsstrahlungsheizung zu erkennen (vgl. Abbildung 26 auf Seite 84). Demnach verhält sich die Höhe der sich ergebenden Schwindung umgekehrt zur gemessenen Temperatur.

### 6.4.5 Schwindung in z-Richtung

Die Werkstücke weisen entlang der z-Achse aufgrund der Gravitation eine Schwindung in Richtung der unteren Begrenzung des Bauraumes auf (z-Schwindung). Unter der Annahme stets positiver Werte für die Schwindung in z-Richtung ( $s_z > 0$ ) bedeutet dies, dass ein Punkt bei  $Z = 0$  keine Schwindung erfährt, alle Punkte  $Z > 0$  sich während der Abkühlphase jedoch in Richtung  $Z = 0$  verschieben. Um die z-Schwindung ermitteln zu können, ist der Bezug zur unteren Begrenzung des Bauraumes notwendig. Dieser Sachverhalt war bei der Gestaltung der Probekörper zu beachten. Die zur Erfassung der x-Schwindung entwickelten Probekörper konnten daher für die z-Richtung nicht verwendet werden, da mit diesen ein Bezug zur Bauraumuntergrenze nicht herstellbar war. Es wurde stattdessen ein Probekörper eingesetzt, welcher aus einer in z-Richtung aneinandergereihten Elementarzelle bestand (vgl. Abbildung 38).

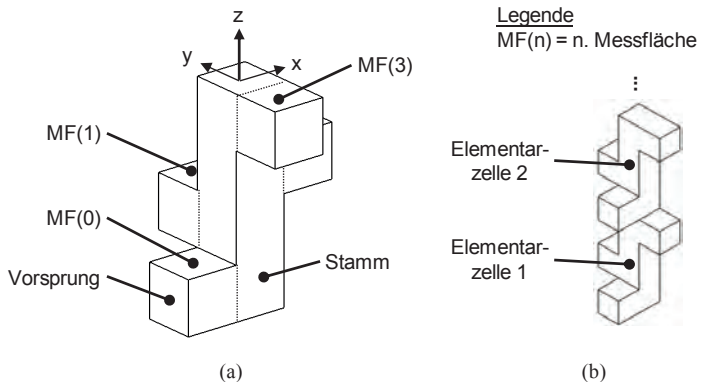


Abbildung 38: Probekörper zur Erfassung der z-Schwindung, (a) Elementarzelle, (b) Aneinanderreihung der Elementarzellen

Die Elementarzelle besteht aus einem Stamm und jeweils vier um 90° in der z-Achse versetzten Vorsprüngen in Form von Würfeln, welche mit dem Stamm

verbunden sind. Die obere Fläche jedes Vorsprungs wird als Messfläche  $MF$  bezeichnet, welche entsprechend der  $z$ -Position fortlaufend nummeriert ist. Die unterste Fläche  $MF(0)$  dient als Referenzmessfläche. Durch die Aneinanderreihung mehrerer Elementarzellen entsteht ein längliches Werkstück mit spiralförmig angeordneten Messflächen, welches sich über den gesamten verfügbaren Bauraum erstrecken kann. Die oberste Elementarzelle kann dabei auch nur anteilig verwendet werden, um den verfügbaren Bauraum gut ausnutzen zu können. Die anteilige Elementarzelle muss dann jedoch mit einer Messfläche abschließen. Die technische Zeichnung kann der Abbildung 54 im Anhang unter Abschnitt 10.1 entnommen werden. Die  $z$ -Position einer Messfläche  $MF(n)$  wird mit  $Z_{MF(n)}$  bezeichnet. Die zwischen einer Messfläche  $MF(n)$  und der Referenzmessfläche  $MF(0)$  auftretende Schwindung  $s_z(n)$  kann nach Gleichung (13) bestimmt werden, welche auf Gleichung (5) (vgl. Seite 30) basiert:

$$s_z(n) = \frac{(Z_{MF(n)} - Z_{MF(0)})_{soll}}{(Z_{MF(n)} - Z_{MF(0)})_{ist}} - 1 \quad (13)$$

Die Vermessung der Probekörper wurde ebenfalls mit dem Höhenmessgerät Hi\_Cal 300 durchgeführt. Aufgrund der Oberflächenrauheit der Probekörper gilt nach der Prüfmittelfähigkeit ein Wert, unterhalb dessen Abweichungen der Abmessungen nicht prozesssicher festgestellt werden können. Die Prüfmittelfähigkeit und die minimale Abweichung  $A_{min,2}$  mussten deshalb auch bei der Dimensionierung des Probekörpers für die Erfassung der  $z$ -Schwindung beachtet werden. Zur Dimensionierung war die Wahl einer geeigneten Kantenlänge des Würfels notwendig. Durch die Wahl eines geringen Wertes ist eine hohe Ortsauflösung möglich, da die Anzahl der aneinandergereihten Elementarzellen dadurch erhöht werden kann. Ein Nachteil ist dabei, dass der Aufwand zur Vermessung ebenfalls steigt.

Ebenso wie bei der  $x$ -Schwindung wurde auch hier eine Streuung der Schwindungswerte um  $\pm 0,5\%$  um die lineare Schwindungskompensation angenommen, wobei die lineare Schwindungskompensation über die Werte  $Z0$  und  $Z300$  definiert war. Die aufgrund der Prüfmittelfähigkeit minimal erfassbare Abweichung  $A_{min,2}$  definiert zwei Grenzen. Die obere Grenze entspricht der positiven Abweichung der Schwindung von der linearen Schwindungskompensation, welche gerade noch prozesssicher erfasst werden kann. Für die obere Grenze gilt Gleichung (14):

$$f_{oben}(z) = \left[ Z0 + \frac{Z300 - Z0}{300 \text{ mm}} \cdot z \right] + \left[ \frac{(z - Z_{Ref})}{(z - Z_{Ref}) - A_{min,2}} - 1 \right] \quad (14)$$

Die untere Grenze stellt entsprechend dazu die negative Abweichung der Schwindung von der linearen Schwindungskompensation dar, welche gerade noch prozesssicher erfasst werden kann. Für die untere Grenze gilt Gleichung (15):

$$f_{unten}(z) = \left[ Z_0 + \frac{Z_{300} - Z_0}{300 \text{ mm}} \cdot z \right] + \left[ \frac{(z - Z_{Ref})}{(z - Z_{Ref}) + A_{min,2}} - 1 \right] \quad (15)$$

Der erste Term der Gleichung (14) bzw. Gleichung (15) repräsentiert die lineare Funktion der Schwindungskompensation, welche über die Werte  $Z_0$  und  $Z_{300}$  definiert ist. Der zweite Term berücksichtigt die positive bzw. die negative Schwindung durch die negative bzw. die positive Abweichung  $A_{min,2}$ , welche gerade noch prozesssicher erfasst werden kann. Die beschriebenen Grenzen sind dabei nicht nur von der  $z$ -Position abhängig, sondern von der Differenz einer  $z$ -Position und einer Referenzposition  $Z_{Ref}$ . Dies berücksichtigt die Tatsache, dass eine Schwindung in  $z$ -Richtung immer nur zwischen zwei Positionen festgestellt werden kann.

Abbildung 39 zeigt den zuvor beschriebenen Zusammenhang zwischen der linearen Schwindungskompensation (definiert über die Werte  $Z_0$  und  $Z_{300}$ ), den angenommenen Streubereich um die lineare Schwindungskompensation und die obere und untere Grenze durch die Prüfmittelfähigkeit auf. Für die Darstellung sowie für die nachfolgende Erfassung der  $z$ -Schwindung wird immer eine Referenzposition von  $Z_{Ref} = 0 \text{ mm}$  verwendet, d. h., der Bezug erfolgt immer auf die untere Begrenzung des Bauraumes.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

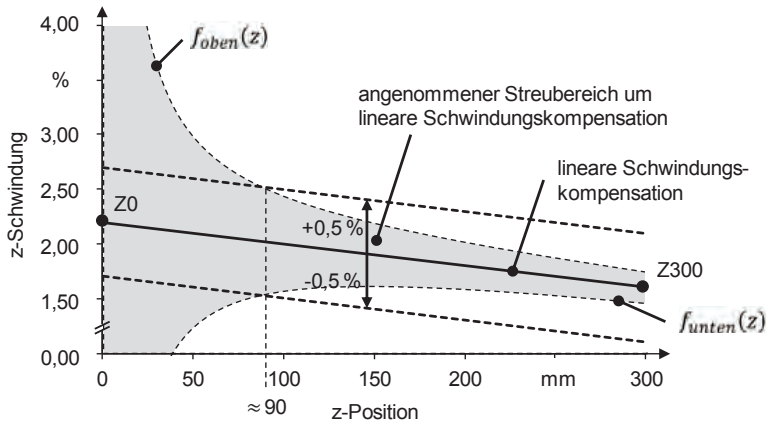
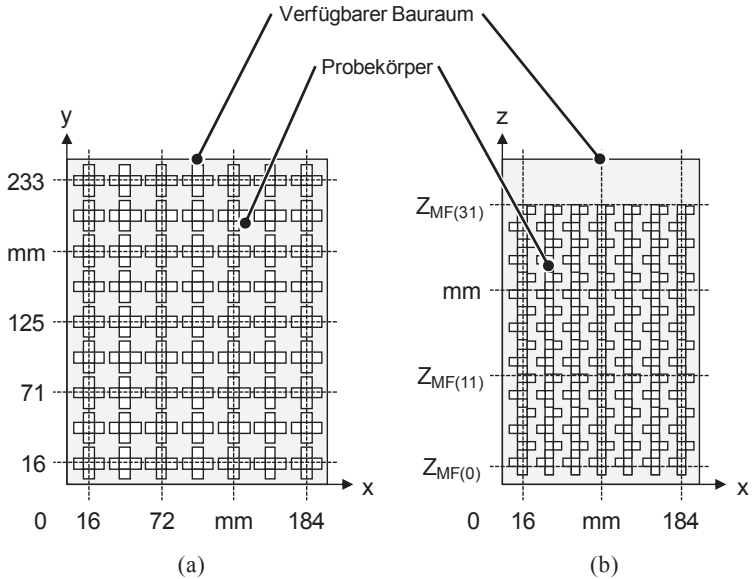


Abbildung 39: Beachtung der Prüfmittelfähigkeit bei der Erfassung der z-Schwindung für  $Z_{Ref} = 0$  mm

Aus der Abbildung wird der Bereich ersichtlich, welcher von der oberen und der unteren Grenze eingeschlossen wird (grau markiert). Innerhalb dieses Bereiches konnte die Prüfmittelfähigkeit nicht eingehalten werden. Unter der Annahme einer Streuung der Schwindung um die lineare Schwindungskompensation von  $\pm 0,5\%$  wurde die Prüfmittelfähigkeit erst für Werte von  $Z > 90$  mm eingehalten. Die Wahl der Kantenlänge des Würfels konnte unabhängig von der Prüfmittelfähigkeit vorgenommen werden, da die Kantenlänge nur Auswirkungen auf die Ortsauflösung der positionsabhängigen Schwindung hat, nicht jedoch auf die z-Position, bei welcher eine prüfmittelfähige Messung möglich wird.

Als Kompromiss zwischen einer hohen örtlichen Auflösung der z-Schwindung und dem daraus resultierenden Aufwand zur Vermessung wurde die Kantenlänge auf  $9$  mm festgelegt. Durch diese Wahl ergab sich im verfügbaren Bauraum eine maximale Aneinanderreihung von 8 Elementarzellen. Abbildung 40 zeigt die regelmäßige Positionierung und Orientierung der insgesamt 63 Probekörper im virtuellen Bauraum des untersuchten Systems.





*Abbildung 40: Platzierung der Probekörper zur Erfassung der z-Schwindung,  
(a) Ansicht von oben, (b) Ansicht von vorne*

Jeder Probekörper umfasste insgesamt 32 Messflächen, wodurch der virtuelle Bauraum durch  $7 \cdot 9 \cdot 1 \cdot (32 - 1) = 1953$  Schwindungswerte kartografiert werden konnte. Abbildung 41 zeigt exemplarisch den für den mittig in der Baufäche positionierten Probekörper ( $X = 100 \text{ mm}$ ,  $Y = 125 \text{ mm}$ ) ermittelten Verlauf für die z-Schwindung. Die vollständige Übersicht der erfassten Messwerte kann Tabelle 16 im Anhang unter Abschnitt 10.5 entnommen werden.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

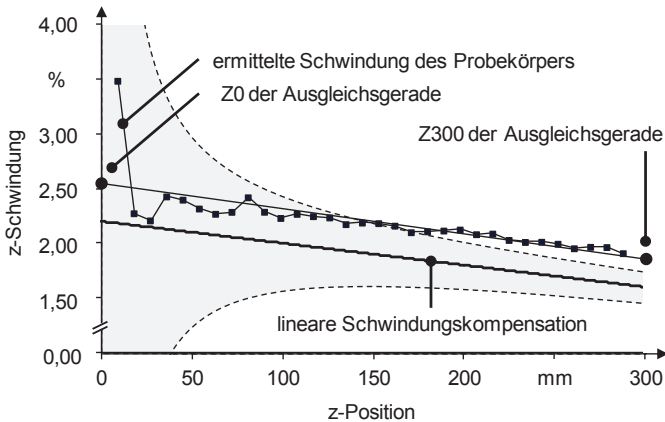


Abbildung 41: Ermittelter Verlauf der z-Schwindung für den mittig positionierten Probekörper

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die an dem ausgewählten Probekörper wirkende Schwindung wertmäßig durchweg über der linearen Schwindungskompensation lag. Zudem ist ersichtlich, dass mit geringer werdendem Abstand zur Prüfmittelfähigkeitsgrenze die Schwankungen abnahmen. Der ermittelte Verlauf der z-Schwindung konnte mittels einer Regressionsanalyse durch eine Ausgleichsgerade angenähert werden, welche durch die Werte  $Z_0$  und  $Z_{300}$  beschrieben werden kann, jedoch nur für die Position des ausgewählten Probekörpers gültig ist.

Bei der Auswertung aller Probekörper ist ferner auffallend, dass die lineare Schwindungskompensation positionsabhängig unter- bzw. überschritten wird. Abbildung 42 zeigt dies exemplarisch anhand von vier Ebenen auf unterschiedlichen z-Positionen. Dabei wird jeweils die Abweichung  $\Delta s_z$  der ermittelten z-Schwindung von der bisherigen linearen Schwindungskompensation, beschrieben durch die Werte  $Z_0$  und  $Z_{300}$ , visualisiert.

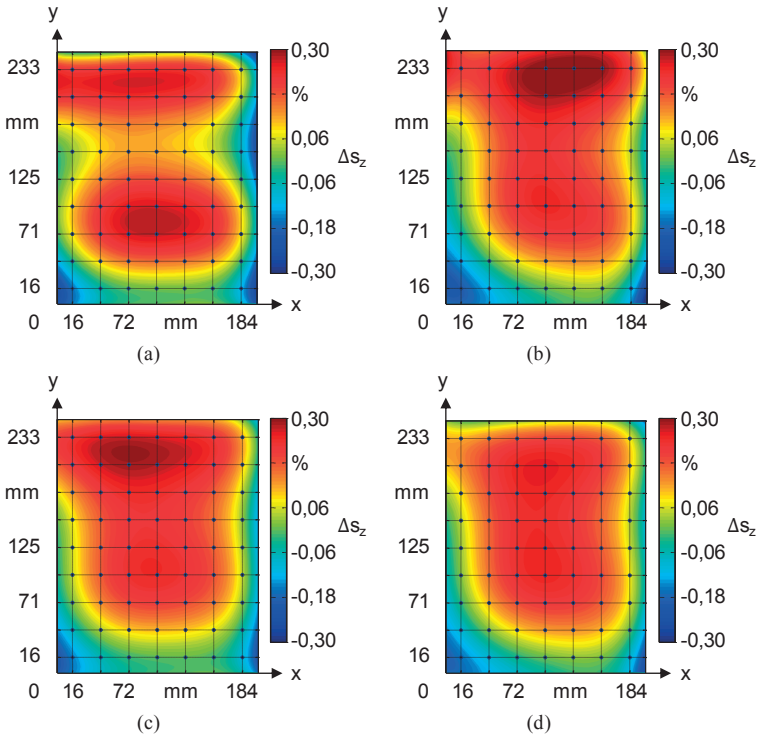


Abbildung 42: Positionsabhängigkeit der z-Schwindigkeit für unterschiedliche z-Positionen, (a)  $Z=72$  mm, (b)  $Z=126$  mm, (c)  $Z=180$  mm, (d)  $Z=234$  mm

Weitgehend unabhängig von der z-Position kam es hierbei durch die lineare Schwindungskompensation in der Mitte der Baufläche sowie im hinteren Bereich zu einer Unterkompensation, d. h., an den Probekörper trat weiterhin eine Schwindung auf. Im vorderen Bereich der Baufläche sowie am linken und rechten Rand kam es dagegen zu einer Überkompensation, d. h., die Probekörper waren zu stark vorskaliert, woraus zu geringe Abmessungen resultierten. Die Abbildungen verdeutlichen, dass die bisherige lineare Schwindungskompensation die positionsabhängige Schwindung nicht ausreichend berücksichtigt.

Zur weiteren Verwendung der Daten war es notwendig, diese zu formalisieren und in mathematische Funktionen zu überführen (vgl. Abschnitt 5.3.3.4 auf Seite 63). Zur Vereinheitlichung mit der bisherigen Schwindungskompensation wur-

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

---

den die Schwindungen der Probekörper durch eine von der Position  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  abhängige lineare Gleichung (16) dargestellt, welche über die Werte  $Z_0$  und  $Z_{300}$  definiert ist:

$$s_z(X, Y, Z) = Z_{0_{X,Y}} + \frac{Z_{300_{X,Y}} - Z_{0_{X,Y}}}{300 \text{ mm}} \cdot Z \quad (16)$$

Für den für Abbildung 41 exemplarisch ausgewählten Probekörper ergaben sich die folgenden Werte:

- $Z_{0_{X=100 \text{ mm}, Y=125 \text{ mm}}} = 2,55 \%$
- $Z_{300_{X=100 \text{ mm}, Y=125 \text{ mm}}} = 1,86 \%$

Die Werte aller 63 Probekörper können der Tabelle 17 im Anhang unter Abschnitt 10.5 entnommen werden.

Gleichung (16) gibt ausschließlich die  $z$ -Schwindung an einer definierten Position im Bauraum wieder. Um die Auswirkungen der positionsabhängigen Schwindung auf die Abmessungen eines Werkstückes zu bestimmen, kann Gleichung (9) verwendet werden (vgl. Seite 33).

Nach PAPULA (2001) gilt unter Vernachlässigung der Integrationskonstante der Zusammenhang nach Gleichung (17).

$$\int \frac{dx}{ax+b} = \frac{1}{a} \cdot \ln|ax + b| \text{ für } a \neq 0 \quad (17)$$

Basierend auf den Gleichungen (16) und (17) kann die aus der positionsabhängigen Schwindung resultierende Länge  $l_{Res}$  eines Werkstückes, welches zwischen den Positionen  $Z_1$  und  $Z_2$  positioniert ist, nach Gleichung (18) bestimmt werden:

$$l_{Res} = \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{dz}{1 + Z_{0_{X,Y}} + \frac{Z_{300_{X,Y}} - Z_{0_{X,Y}}}{300 \text{ mm}} \cdot Z} = \left[ \frac{300 \text{ mm}}{Z_{300_{X,Y}} - Z_{0_{X,Y}}} \cdot \ln \left| \frac{Z_{300_{X,Y}} - Z_{0_{X,Y}}}{300 \text{ mm}} \cdot Z + 1 + Z_{0_{X,Y}} \right| \right]_{Z_1}^{Z_2} \quad (18)$$

Dabei gilt die Gleichung nur für  $Z_0 \neq Z_{300}$ . Der Fall  $Z_0 = Z_{300}$  ist für die Praxis derzeit als nicht relevant anzusehen, da aufgrund der konstruktiven Gestaltung der Lasersintersysteme zwangsläufig eine Temperaturverteilung resultiert, welche unterschiedliche Werte für die Schwindung an den Positionen  $Z = 0 \text{ mm}$  und  $Z = 300 \text{ mm}$  hervorruft.

## 6.5 Diskussion der Prozessfähigkeit

### 6.5.1 Vorgehen

Wie in Abschnitt 2.3.4 (Seite 19) beschrieben, ist ein Prozess dann als fähig zu bezeichnen, wenn ein Merkmal in gleichbleibender Weise innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen erzeugt werden kann. Für die hier allgemein durchgeführten Untersuchungen sind keine Toleranzgrenzen bekannt, da diese immer anwendungsspezifischen Vorgaben unterliegen. Zur Diskussion der Prozessfähigkeit wurden deshalb die Auswirkungen der durch die Maschinencharakteristik hervorgerufenen Schwindung ( $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Schwindung) auf die Einhaltung der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) untersucht. Bei der Anwendung der Methode auf ein reales Szenario müssen die dafür definierten Toleranzen verwendet werden.

Die in absoluten Größen angegebenen Werte in den Allgemeintoleranzen können mit Gleichung (5) (vgl. Seite 30) in Schwindungswerte umgerechnet werden. Bedingt durch die Definition der Schwindung ergaben sich trotz der symmetrischen Grenzabmaße asymmetrische Schwindungswerte. Tabelle 5 zeigt exemplarisch die Umrechnung der Grenzabmaße und der Nennmaße in Grenzschnwindungen am Beispiel des Nennmaßbereiches  $[0,5 \text{ mm}; 3 \text{ mm}[$  und der Toleranzklasse *fein* der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b). Die restriktiveren Grenzschnwindungen erhält man unter Zugrundelegung der oberen Grenze des Nennmaßbereiches.

*Tabelle 5: Umrechnung der Grenzabmaße und der Nennmaße in Grenzschnwindungen am Beispiel des Nennmaßbereiches  $[0,5 \text{ mm}; 3 \text{ mm}[$  und der Toleranzklasse *fein* der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b)*

		Nennmaßbereich	
		Untere Grenze 0,5 mm	Obere Grenze 3 mm
Grenzabmaße	Untere Grenze -0,05 mm	11,11%	1,69 %
	Obere Grenze 0,05 mm	-9,09 %	-1,64 %

Für Tabelle 6 wurden für alle Nennmaßbereiche und Toleranzklassen der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) die Grenzschnwindungen ermittelt.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

Für das untersuchte System sind nicht alle Werte nach Tabelle 6 relevant. Durch die Größe des Bauraumes waren Werkstücke mit Dimensionen über 400 mm nicht realisierbar. Zudem wurde der Bereich durch die gegebene Prüfmittelfähigkeit eingeschränkt. Die für die folgenden Untersuchungen nicht relevanten Bereiche wurden entsprechend gekennzeichnet.

Tabelle 6: Umrechnung der Grenzabmaße nach DIN ISO 2768-1 (1991b) in Grenzschnidungen

Toleranz- klasse	Grenzschnidungen für Nennmaßbereiche							
	≥ 0,5	≥ 3	≥ 6	≥ 30	≥ 120	≥ 400	≥ 1000	≥ 2000
	< 3	< 6	< 30	< 120	< 400	< 1000	< 2000	< 4000
fein	-1,64 %	-0,83 %	-0,33%	-0,12 %	-0,05 %	-0,03 %	-0,02 %	
	1,69 %	0,84 %	0,33%	0,13 %	0,05 %	0,03 %	0,03 %	
mittel	-3,23 %	-1,64 %	-0,66%	-0,25 %	-0,12 %	-0,08 %	-0,06 %	-0,05 %
	3,45 %	1,69 %	0,67%	0,25 %	0,13 %	0,08 %	0,06 %	0,05 %
grob	-6,25 %	-4,76 %	-1,64%	-0,66 %	-0,30 %	-0,20 %	-0,15 %	-0,10 %
	7,14 %	5,26 %	1,69%	0,67 %	0,30 %	0,20 %	0,15 %	0,10 %
sehr grob		-7,69 %	-3,23%	-1,23 %	-0,62 %	-0,40 %	-0,30 %	-0,20 %
		9,09 %	3,45%	1,27 %	0,63 %	0,40 %	0,30 %	0,20 %

Legende:

(alle Werte in mm, sofern nicht anders angegeben)



Aufgrund der Prüfmittelfähigkeit und der Werkstückgröße nicht relevanter Bereich



Aufgrund der Prüfmittelfähigkeit und der Werkstückgröße relevanter Bereich

### 6.5.2 Schwindung in x-Richtung

Bedingt durch die limitierten Abmessungen des Probekörpers und die gegebene Prüfmittelfähigkeit war es nicht möglich, die potenziell vorhandene positionsabhängige x-Schwindung sicher festzustellen. Aus Abbildung 34 (Seite 93) bzw. aus den zugrunde liegenden Messwerten ist ersichtlich, dass maximale Abweichungen von  $\pm 0,13 \text{ mm}$  vom Sollwert der Länge der Probekörper (87,0 mm) ermittelt wurden, welche jedoch vollständig in dem Bereich lagen, welcher aufgrund der Prüfmittelfähigkeit nicht prozesssicher vermessen werden konnte. Dies entspricht einer maximalen Abweichung der durch die Positionsabhängigkeit

hervorgerufenen Schwindung von  $\pm 0,15\%$  um den Standardwert von  $3,20\%$  (vgl. Abschnitt 6.2 ab Seite 79), welche bei der gewählten Schwindungskompensation noch auftritt. Basierend auf diesen Abweichungen sind in Tabelle 8 die Toleranzklassen und Nennmaßbereiche dargestellt, welche beim untersuchten System prozesssicher erreicht werden können.

Tabelle 7: Bewertung der Prozessfähigkeit, basierend auf der  $x$ -Schwindung

Toleranz- klasse	Grenzschnidungen für Nennmaßbereiche							
	$\geq 0,5$	$\geq 3$	$\geq 6$	$\geq 30$	$\geq 120$	$\geq 400$	$\geq 1000$	$\geq 2000$
	$< 3$	$< 6$	$< 30$	$< 120$	$< 400$	$< 1000$	$< 2000$	$< 4000$
<b>fein</b>	-1,64 %	-0,83 %	-0,33%	-0,12 %	-0,05 %	-0,03 %	-0,02 %	
	1,69 %	0,84 %	0,33%	0,13 %	0,05 %	0,03 %	0,03 %	
<b>mittel</b>	-3,23 %	-1,64 %	-0,66%	-0,25 %	-0,12 %	-0,08 %	-0,06 %	-0,05 %
	3,45 %	1,69 %	0,67%	0,25 %	0,13 %	0,08 %	0,06 %	0,05 %
<b>grob</b>	-6,25 %	-4,76 %	-1,64%	-0,66 %	-0,30 %	-0,20 %	-0,15 %	-0,10 %
	7,14 %	5,26 %	1,69%	0,67 %	0,30 %	0,20 %	0,15 %	0,10 %
<b>sehr grob</b>		-7,69 %	-3,23%	-1,23 %	-0,62 %	-0,40 %	-0,30 %	-0,20 %
		9,09 %	3,45%	1,27 %	0,63 %	0,40 %	0,30 %	0,20 %

Legende:

(alle Werte in mm, sofern nicht anders angegeben)

- Bereich für eingeschränkt fähigen Prozess
- Bereich für fähigen Prozess

Es sind alle Bereiche als *fähig* markiert, welche außerhalb der oben genannten Grenzen liegen, d. h., welche weniger restriktive Anforderungen aufweisen. Unter Berücksichtigung der Bereiche in Tabelle 6, welche aufgrund der Prüfmittelfähigkeit bzw. aufgrund der Werkstückgröße nicht relevant sind, schränkt dies die Bereiche für einen fähigen Prozess weiter ein. Für das untersuchte System können somit maximal Werkstücke in der Toleranzklasse *grob* über  $6\text{ mm}$  Nennmaß prozesssicher gefertigt werden.

Die beschriebene Einteilung in Bereiche für fähige Prozesse und eingeschränkt fähige Prozesse gilt unter Vernachlässigung der Positionsabhängigkeit. Es handelt sich somit um eine konservative Abschätzung bezüglich der Fähigkeit des untersuchten Systems. Die Möglichkeit zur Erreichung einer höheren Toleranzklasse in einem bestimmten Nennmaßbereich ist anwendungsspezifisch zu überprüfen.

6.5.3 Schwindung in y-Richtung

Die Probekörper zur Erfassung der y-Schwindung weisen die gleichen Einschränkungen wie die Probekörper zur Erfassung der x-Schwindung auf. Formal war es auch hierfür nicht möglich, die Schwindung prozesssicher festzustellen. Wie aus Abbildung 36 (vgl. Seite 95) ersichtlich wird, ist jedoch eine Positionsabhängigkeit der Schwindung zu erkennen, welche eine deutliche Übereinstimmung mit den Ergebnissen der thermischen Analyse liefert. Alle Probekörper wiesen eine geringere Schwindung auf, als sie durch die Schwindungskompensation berücksichtigt ist. Dies ist daran ersichtlich, dass sich der ermittelte Schwindungsbereich von 0,00 % bis -0,16 % erstreckt. Durch eine Kalibrierung des Standardwerts zur Kompensation der y-Schwindung ist es möglich, den aufgrund der Positionsabhängigkeit ermittelten Schwindungsbereich so zu verschieben, dass der Mittelwert bei 0,00 % liegt. Es ergibt sich dann eine durch die Positionsabhängigkeit hervorgerufene Schwankung von -0,08 % bis +0,08 %. Tabelle 8 veranschaulicht die Bereiche der Allgemeintoleranzen, welche unter der Annahme einer Neukalibrierung prozesssicher eingehalten werden können.

Tabelle 8: Bewertung der Prozessfähigkeit, basierend auf der y-Schwindung

Toleranz- klasse	Grenzwerte für Nennmaßbereiche							
	≥ 0,5	≥ 3	≥ 6	≥ 30	≥ 120	≥ 400	≥ 1000	≥ 2000
	< 3	< 6	< 30	< 120	< 400	< 1000	< 2000	< 4000
fein	-1,64 %	-0,83 %	-0,33%	-0,12 %	-0,05 %	-0,03 %	-0,02 %	
	1,69 %	0,84 %	0,33%	0,13 %	0,05 %	0,03 %	0,03 %	
mittel	-3,23 %	-1,64 %	-0,66%	-0,25 %	-0,12 %	-0,08 %	-0,06 %	-0,05 %
	3,45 %	1,69 %	0,67%	0,25 %	0,13 %	0,08 %	0,06 %	0,05 %
grob	-6,25 %	-4,76 %	-1,64%	-0,66 %	-0,30 %	-0,20 %	-0,15 %	-0,10 %
	7,14 %	5,26 %	1,69%	0,67 %	0,30 %	0,20 %	0,15 %	0,10 %
sehr grob		-7,69 %	-3,23%	-1,23 %	-0,62 %	-0,40 %	-0,30 %	-0,20 %
		9,09 %	3,45%	1,27 %	0,63 %	0,40 %	0,30 %	0,20 %

Legende:

(alle Werte in mm, sofern nicht anders angegeben)

Bereich für eingeschränkt fähigen Prozess

Bereich für fähigen Prozess



Unter Berücksichtigung der Prüfmittelfähigkeit können bei dem untersuchten System Werkstücke über 120 mm Nennmaß in der Toleranzklasse *mittel* prozesssicher gefertigt werden.

### 6.5.4 Schwindung in z-Richtung

Wie aus Abbildung 42 (vgl. Seite 103) ersichtlich wird, kann eine ausgeprägte Positionsabhängigkeit der z-Schwindung festgestellt werden. Zur Überführung der ermittelten Schwindungsverteilung in prozessfähige und nur eingeschränkt prozessfähige Bereiche der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) ist die Verwendung der von den Messdaten abgeleiteten Ausgleichsgeraden (vgl. Tabelle 17 im Anhang unter Abschnitt 10.5) zweckmäßig. Abbildung 43 stellt den ermittelten Streubereich der z-Schwindung für das untersuchte System dar.

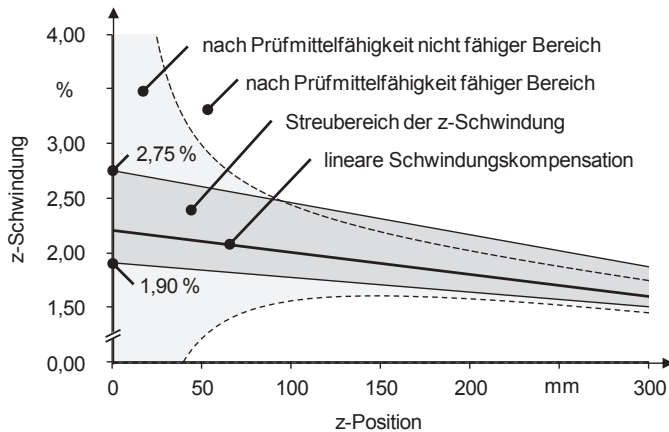


Abbildung 43: Ermittelter Streubereich der z-Schwindung

Die größte Abweichung zwischen minimaler und maximaler Schwindung ergab sich dabei für den Faktor  $Z_0$  zu  $2,75\% - 1,90\% = 0,85\%$ . Unter der Annahme einer nachjustierten Schwindungskompensation treten bei dem untersuchten System somit symmetrische Abweichungen von  $\pm 0,43\%$  auf. Tabelle 9 zeigt die davon abgeleiteten Bereiche der Allgemeintoleranzen, welche prozesssicher gefertigt werden können.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

Tabelle 9: Bewertung der Prozessfähigkeit basierend auf z-Schwindung

Toleranz- klasse	Grenzschnidungen für Nennmaßbereiche							
	≥ 0,5	≥ 3	≥ 6	≥ 30	≥ 120	≥ 400	≥ 1000	≥ 2000
	< 3	< 6	< 30	< 120	< 400	< 1000	< 2000	< 4000
fein	-1,64 %	-0,83 %	-0,33%	-0,12 %	-0,05 %	-0,03 %	-0,02 %	
	1,69 %	0,84 %	0,33%	0,13 %	0,05 %	0,03 %	0,03 %	
mittel	-3,23 %	-1,64 %	-0,66%	-0,25 %	-0,12 %	-0,08 %	-0,06 %	-0,05 %
	3,45 %	1,69 %	0,67%	0,25 %	0,13 %	0,08 %	0,06 %	0,05 %
grob	-6,25 %	-4,76 %	-1,64%	-0,66 %	-0,30 %	-0,20 %	-0,15 %	-0,10 %
	7,14 %	5,26 %	1,69%	0,67 %	0,30 %	0,20 %	0,15 %	0,10 %
sehr grob		-7,69 %	-3,23%	-1,23 %	-0,62 %	-0,40 %	-0,30 %	-0,20 %
		9,09 %	3,45%	1,27 %	0,63 %	0,40 %	0,30 %	0,20 %

Legende:

(alle Werte in mm, sofern nicht anders angegeben)

- Bereich für eingeschränkt fähigen Prozess
- Bereich für fähigen Prozess

In Aufbaurichtung ist aufgrund der ausgeprägten Positionsabhängigkeit der Schwindung ohne weitere Prüfung maximal die Toleranzklasse *grob* erzielbar. Durch eine anwendungsspezifische Untersuchung können unter Umständen jedoch auch bessere Toleranzklassen erreicht werden.

### 6.5.5 Ableitung des weiteren Vorgehens

In den vorangehenden Abschnitten wurden jeweils die Schwindungen in *x*-, *y*- und *z*-Richtung positionsabhängig erfasst. Für die *x*-Schwindung (vgl. Abschnitt 6.4.3 ab Seite 91) konnte kein Indiz für das Vorhandensein einer Positionsabhängigkeit festgestellt werden. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in der Tatsache, dass nur Schwindungen ermittelt wurden, welche aufgrund der Oberflächenrauheit der Probekörper und der damit einhergehenden geringen Prüfmittelfähigkeit nicht prozesssicher erfasst werden konnten.

Auch für die *y*-Schwindung konnten keine Abweichungen von der bisherigen Schwindungskompensation festgestellt werden, welche prozesssicher erfasst werden konnten (vgl. Abschnitt 6.4.4 ab Seite 94). Die in Abbildung 37 (Seite 96) aufgezeigte Verteilung liefert zwar ein Indiz für das Vorhandensein einer

## 6.6 Erhöhung der Prozessfähigkeit durch Rückführung der Maschinencharakteristik

---

Positionsabhängigkeit der Schwindung, diese kann jedoch aufgrund der geringen Prüfmittelfähigkeit nicht sicher nachgewiesen werden.

Für die Schwindung in z-Richtung konnte dagegen eine deutliche Positionsabhängigkeit festgestellt werden. Die hierbei ermittelten Werte überstiegen die durch die Prüfmittelfähigkeit vorgegebenen Grenzen und können deshalb als „prozesssicher erfasst“ bezeichnet werden.

Aufgrund der Tatsache, dass nur für die Schwindung in Aufbaurichtung die Prüfmittelfähigkeit eingehalten werden konnte, soll im Abschnitt 6.6 die Untersuchung der Erhöhung der Prozessfähigkeit für die z-Schwindung beschrieben werden.

## 6.6 Erhöhung der Prozessfähigkeit durch Rückführung der Maschinencharakteristik

### 6.6.1 Vorgehen

Wie in Abschnitt 5.4.3 (vgl. Seite 66) beschrieben wurde, ist eine Rückführung der Maschinencharakteristik nur dann notwendig, wenn die für eine Anwendung spezifizierten Toleranzen nicht eingehalten werden können. Durch das Schwindungsverhalten des untersuchten Systems ist eine Fertigung von Werkstücken mit der Toleranzklasse *grob* nach DIN ISO 2768-1 (1991b) möglich. Nachfolgend soll die Untersuchung beschrieben werden, wie durch eine Rückführung der erfassten Maschinencharakteristik eine Erhöhung der Prozessfähigkeit, d. h. die Erreichung von feineren Toleranzklassen, erzielt werden kann. Zur Verbesserung der geometrischen Eigenschaften additiv gefertigter Werkstücke ist eine Rückführung der Maschinencharakteristik in die Konstruktion, die Vorbereitung und den Aufbauprozess möglich (vgl. Abschnitt 5.5.7 ab Seite 75). Eine Einflussnahme auf den Aufbauprozess ist bei dem untersuchten System nur durch die Prozessparameter realisierbar (vgl. Tabelle 20 im Anhang unter Abschnitt 10.6). Eine gezielte Steuerung der Wärmeverteilung durch diese ist jedoch nicht vorgesehen. Konstruktive Anpassungen des untersuchten Fertigungssystems (z. B. der Heizungen) sind denkbar, haben jedoch den Nachteil, dass diese nur für eine einzelne Maschine gültig sind. Weist ein anderes Fertigungssystem z. B. eine andere Wärmeverteilung auf, so muss die konstruktive Anpassung der Heizungen wieder neu durchgeführt werden. Die Erhöhung der Prozessfähigkeit soll deshalb durch ein Verfahren umgesetzt werden, welches durch die Daten parametrisiert

wird. Bei entsprechend anderen Daten (z. B. von einem weiteren Fertigungssystem) kann das Verfahren weiterhin genutzt werden, ohne dass es angepasst werden muss. Das Verfahren liefert dann aufgrund der angepassten Parametrisierung durch die Daten Ergebnisse, welche für das weitere Fertigungssystem gültig sind.

Zur Realisierung wurde eine geometriebasierte Optimierung durchgeführt, welche die digitalen Werkstückdaten derart anpasst, dass die aus den Schwindungseffekten resultierenden Auswirkungen reduziert werden (vgl. Abschnitt 3.4.4 auf Seite 43). Abbildung 44 zeigt das Vorgehen zur Reduzierung der Schwindung mithilfe der geometriebasierten Optimierung.

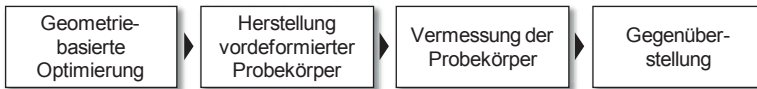


Abbildung 44: Vorgehen zur Reduzierung der Schwindung mithilfe von geometriebasierter Optimierung (vgl. Abschnitt 3.4.4 ab Seite 43)

Dieses Vorgehen wurde exemplarisch für die z-Schwindung verfolgt, da für die Probekörper die Prüfmittelfähigkeit bereichsweise eingehalten und eine potenzielle Erhöhung der Prozessfähigkeit sicher nachgewiesen werden konnte. Die Geometrieanpassung wurde mithilfe der Freiformdeformation durchgeführt, welche nachfolgend beschrieben wird. Die Herstellung der deformierten Probekörper sowie die Auswertung derselben entsprechen dem bereits beschriebenen und üblichen Vorgehen, weshalb auf eine erneute Darstellung verzichtet wird. Abschließend werden die Prozessfähigkeit ohne Berücksichtigung der Maschinencharakteristik sowie die Prozessfähigkeit unter Berücksichtigung der Maschinencharakteristik einander gegenübergestellt.

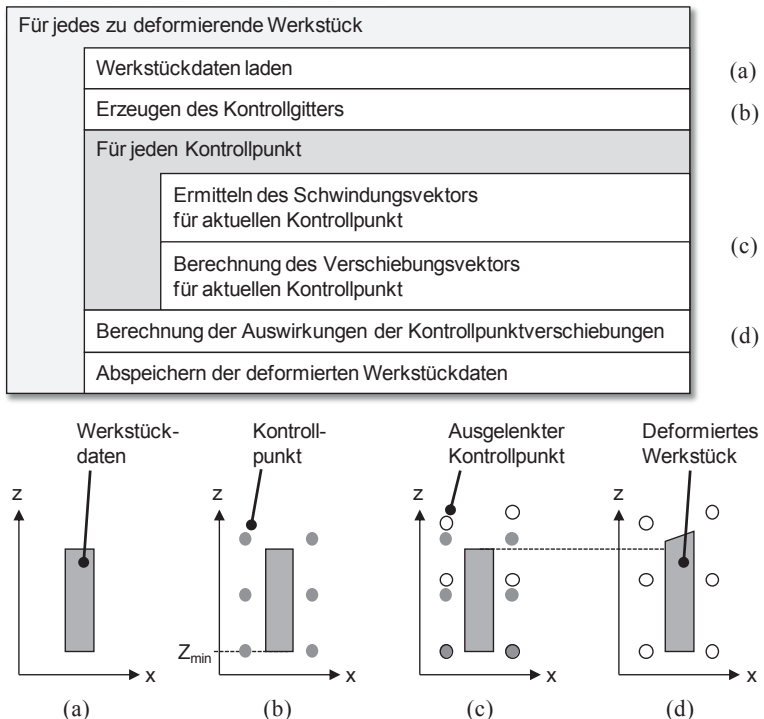
### 6.6.2 Vordeformation der Probekörper

Wie in Abschnitt 5.5.4 (vgl. Seite 71) beschrieben, handelt es sich bei der Freiformdeformation um eine Möglichkeit zur Anpassung der Geometrie triangulierter Daten. Charakteristisch für die Freiformdeformation ist, dass die geometriebasierte Optimierung effizient ausgeführt werden kann, da nicht das geometrische Objekt selbst, sondern der das geometrische Objekt umgebende Raum deformiert wird. Dadurch kann die Zahl der Parameter, welche für die Deformation notwendig sind, unabhängig von dem geometrischen Objekt gewählt werden (HECHLER 2006). Zudem ist als vorteilhaft anzusehen, dass nur eine begrenzte Anzahl an Positionen (sog. Kontrollpunkten) mit bekannter Charakteristik notwendig ist, um eine Deformation durchzuführen. Die Bereiche zwischen den

## 6.6 Erhöhung der Prozessfähigkeit durch Rückführung der Maschinencharakteristik

Kontrollpunkten werden interpoliert. Da die Probekörper aus einfachen Grundgeometrien aufgebaut sind, ist auch eine CAD-gestützte Anpassung sehr leicht möglich. Eine Übertragbarkeit der Vordeformation auf Körper mit Freiformflächen ist dann jedoch nur eingeschränkt durchführbar.

Zum Zwecke einer hohen Übertragbarkeit des demonstrierten Ansatzes wurde die von SEDERBERG & PARRY (1986) entwickelte Freiformdeformation verwendet. Hierfür wurde eine softwaretechnische Umsetzung in der Programmiersprache C# realisiert, welche die Verarbeitung von Dateien im STL-Format ermöglicht und dem in Abbildung 45 schematisch dargestellten Ablauf folgt. Für jedes zu deformierende Werkstück wurden dabei bestimmte Operationen durchgeführt, welche nachfolgend beschrieben werden.



*Abbildung 45: Struktogramm der softwaretechnischen Umsetzung der Freiformdeformation*

Die digitalen Werkstückdaten sind zu laden (a) und mit einem Kontrollgitter,

bestehend aus Kontrollpunkten zu umgeben (b). Als Abstand zwischen den Kontrollpunkten wurde in der  $x$ - $y$ -Ebene ein Wert von  $27\text{ mm}$  gewählt, was den Abmessungen der Probekörper in dieser Ebene entspricht. In Aufbaurichtung wurde ein Abstandswert von  $9\text{ mm}$  gewählt, da genau in diesem Abstand Schwindungswerte ermittelt wurden. Für jedes Werkstück ergab sich ein Kontrollgitter mit einer Gesamtzahl von 128 Kontrollpunkten. Für jeden Kontrollpunkt wurden dann der an der Position des Kontrollpunkts wirkende Schwindungsvektor bestimmt und der Kontrollpunkt entsprechend verschoben (c). Der Schwindungsvektor setzt sich aus den Schwindungen entlang der drei Raumachsen zusammen. Zur Ermittlung des Schwindungsvektors wurde die Maschinencharakteristik an der betreffenden Position ausgewertet. Die Verschiebung des Kontrollpunkts, welche die Grundlage für die nachfolgende Deformation der Werkstückdaten ist, erfolgte nach Gleichung (19):

$$\mathbf{p}_{CPn}^{neu} = \left[ \mathbf{E}_3 + \mathbf{E}_3 \cdot \begin{pmatrix} s_x(\mathbf{p}_{CPn}) \\ s_y(\mathbf{p}_{CPn}) \\ s_z(\mathbf{p}_{CPn}) \end{pmatrix} \right] \cdot \begin{pmatrix} X_{CPn} - X_M \\ Y_{CPn} - Y_M \\ Z_{CPn} - Z_{min} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$\mathbf{p}_{CPn}^{neu}$  bezeichnet hierbei die neue Position  $\mathbf{p}$  des Kontrollpunkts  $CPn$ , welche sich aus je einer  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Koordinate zusammensetzt (vgl. Gleichung (20)).

$$\mathbf{p}_{CP,n} = \begin{pmatrix} X_{CPn} \\ Y_{CPn} \\ Z_{CPn} \end{pmatrix} \quad (20)$$

$\mathbf{E}_3$  ist eine Einheitsmatrix mit drei Dimensionen.  $s_x(\mathbf{p}_{CPn})$  beschreibt den Wert der Schwindung in  $x$ -Richtung an der ursprünglichen Position  $\mathbf{p}$  des Kontrollpunkts  $CPn$ . Der Schwindungswert in  $y$ -Richtung wird mit  $s_y$ , der Schwindungswert in  $z$ -Richtung mit  $s_z$  gekennzeichnet. Bedingt durch die Schwindung in  $x$ - und  $y$ -Richtung erfolgt der Bezug auf den Mittelpunkt der  $x$ - $y$ -Ebene, angegeben durch die Positionen  $X_M$  und  $Y_M$ . In  $z$ -Richtung dagegen wirkt die Schwindung zum untersten Punkt  $Z_{min}$  des Werkstücks. Gleichung (19) beschreibt die Verschiebung der Kontrollpunkte in allen drei Dimensionen. Da ausschließlich eine Kompensation der Schwindung in  $z$ -Richtung erfolgen sollte (vgl. Abschnitt 6.5.5 ab Seite 110), wurden die Schwindungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung nicht berücksichtigt, weshalb  $s_x$  und  $s_y$  jeweils zu Null gesetzt wurden. Nach der Neupositionierung der Kontrollpunkte sind die Auswirkungen der Verschiebungen zu bestimmen (vgl. Abbildung 45 (d)) und die deformierten Werkstückdaten abzuspeichern.

### 6.6.3 Ergebnis

Durch die Vordeformation der Probekörper wird deren äußere Gestalt verändert. Der eigentliche Aufbauprozess bleibt von den Änderungen weitgehend unbeeinflusst. Das Ergebnis der Vordeformation, d. h. der Berücksichtigung der Maschinencharakteristik in der Prozesskette, soll zunächst an dem bereits, wie zuvor beschrieben, explizit untersuchten Probekörper visualisiert werden. Der Probekörper befand sich in der Mitte der Baufläche ( $X = 100 \text{ mm}$ ,  $Y = 125 \text{ mm}$ ). Abbildung 46 zeigt die ermittelte  $z$ -Schwindung am Probekörper jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Maschinencharakteristik. Die vollständige Übersicht aller Messwerte kann Tabelle 18 im Anhang unter Abschnitt 10.5 entnommen werden.

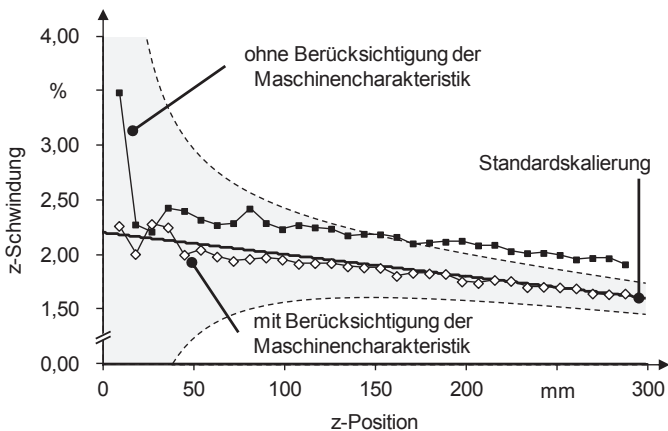


Abbildung 46: Verlauf der  $z$ -Schwindung für den mittig positionierten Probekörper mit und ohne Berücksichtigung der Maschinencharakteristik

Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, nähert sich die Schwindung des Probekörpers dem Verlauf der linearen Schwindungskompensation an. Eine vollständige Kompensation (Idealfall) der positionsabhängigen Schwindung ist dann gegeben, wenn alle Probekörper denselben Verlauf aufweisen, wie durch die lineare Schwindungskompensation berücksichtigt. Insbesondere für geringe Werte von  $Z$  sind Abweichungen vom Idealfall erkennbar. Aufgrund der nicht erfüllten Prüfmittelfähigkeit in diesem Bereich kann deren Ursache jedoch nicht eindeutig identifiziert werden.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

Abbildung 47 macht die Positionsabhängigkeit der z-Schwindung für alle 63 Probekörper anhand von vier Ebenen auf unterschiedlichen z-Positionen sichtbar. Dabei wird jeweils die Abweichung  $\Delta s_z$  der ermittelten z-Schwindung von der linearen Schwindungskompensation visualisiert.

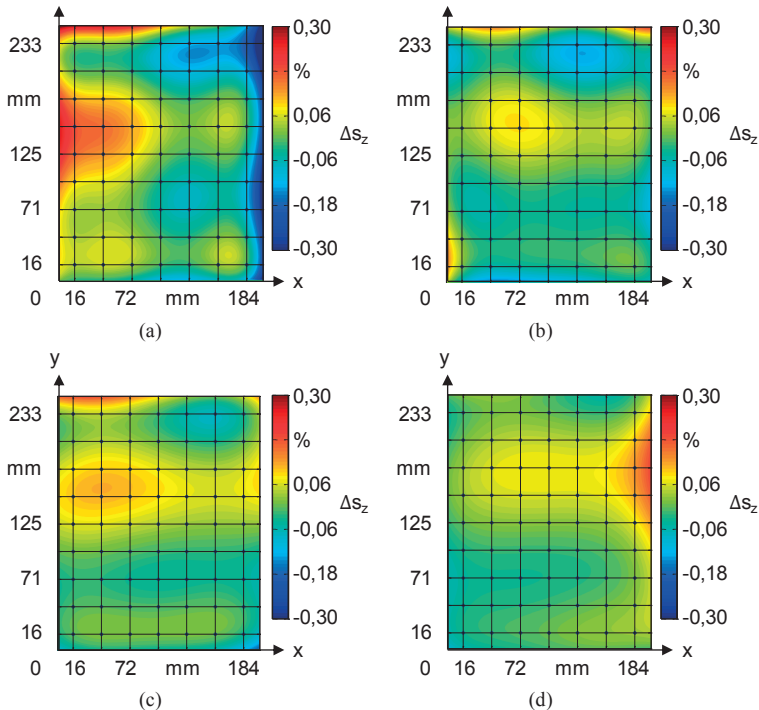


Abbildung 47: Darstellung der Positionsabhängigkeit der z-Schwindung in Bezug auf die lineare Schwindungskompensation nach Rückführung der Maschinencharakteristik für unterschiedliche z-Positionen, (a)  $Z=72$  mm, (b)  $Z=126$  mm, (c)  $Z=180$  mm, (d)  $Z=234$  mm

Der Verlauf der bleibenden z-Schwindung der vordeformierten Probekörper konnte ebenso wie bei den ursprünglichen Probekörpern mittels Regressionsanalyse in eine lineare Funktion überführt und durch die Parameter  $Z_0$  und  $Z_{300}$  definiert werden. Für den untersuchten Probekörper ergaben sich die folgenden Werte:



## 6.6 Erhöhung der Prozessfähigkeit durch Rückführung der Maschinencharakteristik

- $Z0_{X=100\text{ mm}, Y=125\text{ mm}} = 2,14\%$
- $Z300_{X=100\text{ mm}, Y=125\text{ mm}} = 1,60\%$

Die vollständige Liste aller Probekörper kann Tabelle 19 im Anhang unter Abschnitt 10.5 entnommen werden.

Zur Überführung der ermittelten Schwindungsverteilung in Bereiche für fähige und eingeschränkt fähige Bereiche der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) wurden die Ausgleichsgeraden der einzelnen Probekörper verwendet. Abbildung 48 verdeutlicht die Bereiche, welche aus den Ausgleichsgeraden ohne und mit Rückführung der Maschinencharakteristik resultieren.

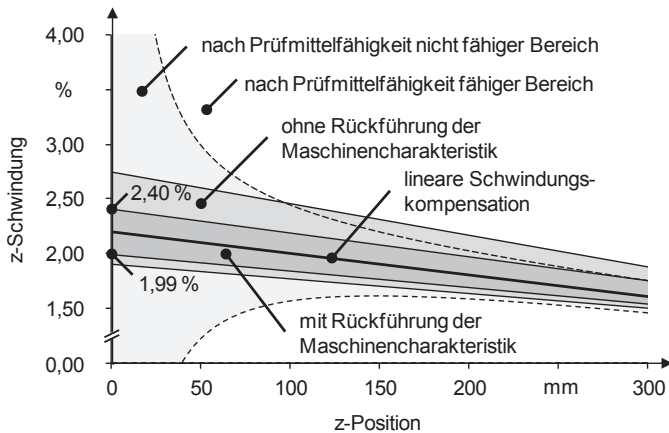


Abbildung 48: Bereiche der Ausgleichsgeraden für die z-Schwindung mit und ohne Rückführung der Maschinencharakteristik




Die größte Abweichung zwischen minimaler und maximaler Schwindung ergab sich für  $Z0$  zu  $2,40\% - 1,99\% = 0,41\%$ . Unter der Annahme einer nachjustierten Schwindungskompensation treten bei dem untersuchten System somit symmetrische Abweichungen von  $\pm 0,21\%$  auf. Tabelle 10 zeigt die davon abgeleiteten Bereiche der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) auf, welche prozesssicher eingehalten werden können.

## 6 Anwendung der Methode am Beispiel des Lasersinterns

Tabelle 10: Bewertung der Prozessfähigkeit basierend auf der z-Schwindung mit rückgeführter Maschinencharakteristik

Toleranz- klasse	Grenzschnidungen für Nennmaßbereiche							
	≥ 0,5	≥ 3	≥ 6	≥ 30	≥ 120	≥ 400	≥ 1000	≥ 2000
	< 3	< 6	< 30	< 120	< 400	< 1000	< 2000	< 4000
fein	-1,64 %	-0,83 %	-0,33%	-0,12 %	-0,05 %	-0,03 %	-0,02 %	
	1,69 %	0,84 %	0,33%	0,13 %	0,05 %	0,03 %	0,03 %	
mittel	-3,23 %	-1,64 %	-0,66%	-0,25 %	-0,12 %	-0,08 %	-0,06 %	-0,05 %
	3,45 %	1,69 %	0,67%	0,25 %	0,13 %	0,08 %	0,06 %	0,05 %
grob	-6,25 %	-4,76 %	-1,64%	-0,66 %	-0,30 %	-0,20 %	-0,15 %	-0,10 %
	7,14 %	5,26 %	1,69%	0,67 %	0,30 %	0,20 %	0,15 %	0,10 %
sehr grob		-7,69 %	-3,23%	-1,23 %	-0,62 %	-0,40 %	-0,30 %	-0,20 %
		9,09 %	3,45%	1,27 %	0,63 %	0,40 %	0,30 %	0,20 %

Legende: (alle Werte in mm, sofern nicht anders angegeben)

-  Bereich für eingeschränkt fähigen Prozess
-  Bereich für fähigen Prozess
-  Bereich für fähigen Prozess, welcher ohne Rückführung der Maschinencharakteristik eingeschränkt fähig war

Durch die Rückführung der Maschinencharakteristik können fünf Bereiche aus unterschiedlichen Toleranzklassen und Nennmaßbereichen, welche ohne Rückführung als nur *eingeschränkt fähig* zu betrachten sind, nun als *fähig* bezeichnet werden. Die Anzahl der Bereiche für einen nur eingeschränkt fähigen Prozess reduziert sich somit von 17 auf 12. Es wird ersichtlich, dass durch die Rückführung der Maschinencharakteristik die z-Schwindung derart reduziert werden kann, dass Werkstücke auch in feineren Toleranzklassen prozesssicher herstellbar sind.

### 6.7 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Anwendung der Methode zur Erhöhung der Prozessfähigkeit exemplarisch für das Verfahren Lasersintern

beschrieben. Hemmnisse bei der Nutzung des Verfahrens bestehen derzeit noch u. a. aufgrund des Prozessdefizits der Schwindung. Einführend wurde das untersuchte System FORMIGA P 100 des Herstellers EOS GmbH Electro Optical Systems vorgestellt. Für die Anwendung wurden die bei der Inbetriebnahme des Systems ermittelten Werte zur Schwindungskompensation sowie zur Strahlkompensation verwendet.

Das System besitzt zur Sicherstellung des Prozessablaufs zwei Heizungen. Thermografische Untersuchungen beider Heizungen zeigten eine ausgeprägte, inhomogene Wärmeverteilung. Durch Messungen mit Thermoelementen direkt im Pulverbett konnten die Ergebnisse der thermografischen Aufnahmen bestätigt werden. Demnach kam es im vorderen Bereich des Bauraumes zu einem erhöhten Wärmeabfluss. Die Temperaturunterschiede im Pulverbett betragen bis zu 3 K während der Bauphase.

Zur Erfassung des Schwindungsverhaltens wurde danach die Fähigkeit des für die Messungen verwendeten Prüfmittels ermittelt. Bedingt durch die hohe Rauheit der Werkstücke konnten dabei nur Abweichungen prozesssicher erfasst werden, welche größer als  $A_{min,2} = 0,433 \text{ mm}$  sind. Dieser Wert bildete die Grundlage für die nachfolgende Gestaltung und Dimensionierung der Probekörper zur Erfassung der Schwindung in den Maschinenachsen  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Die Probekörper wurden im verfügbaren Bauraum des untersuchten Systems positioniert und additiv gefertigt.

Bei der Auswertung der Probekörper konnte festgestellt werden, dass unter Beachtung der Prüfmittelfähigkeit für die  $x$ -Schwindung keine Positionsabhängigkeit ersichtlich ist. Für die Schwindungen in  $y$ -Richtung und  $z$ -Richtung konnten dagegen Verteilungen ermittelt werden, welche qualitative Übereinstimmungen mit den durch die thermografische Untersuchung festgestellten Merkmalen aufwiesen. Die Prozessfähigkeit, basierend auf der Schwindung, wurde jeweils anhand der Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) diskutiert.

Die Rückführung der Maschinencharakteristik erfolgte exemplarisch durch eine geometriebasierte Optimierung in Form einer Vordeformation der Probekörper zur Reduzierung der  $z$ -Schwindung. Die Anpassung der Probekörper wurde dabei mithilfe der Freiformdeformation (vgl. Abschnitt 6.6.2 ab Seite 112) vorgenommen. Es konnte gezeigt werden, dass unter der Berücksichtigung der Maschinencharakteristik die Prozessfähigkeit derart gesteigert werden kann, dass nach den Allgemeintoleranzen gemäß DIN ISO 2768-1 (1991b) z. T. Werkstücke einer höheren Toleranzklasse herstellbar sind.



## **7 Technische und wirtschaftliche Bewertung**

### **7.1 Vorgehen im Kapitel**

Durch die praktische Anwendung der entwickelten Methode kann die Charakteristik eines additiven Fertigungssystems berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, eine höhere Prozessfähigkeit zu erreichen, durch welche die Werkstückqualität und die Reproduzierbarkeit gesteigert werden können.

In den folgenden Abschnitten wird eine technische und wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Methode durchgeführt. In der technischen Bewertung werden die Vor- und Nachteile bei der Nutzung der Methode für unterschiedliche Branchen und Anwendungsszenarien dargelegt. Die wirtschaftliche Bewertung wird mithilfe einer Amortisationsrechnung realisiert. Eine schnelle Amortisation kann sowohl durch höhere Verkaufserlöse als auch durch eine Reduzierung von Ausschuss begünstigt werden.

### **7.2 Technische Bewertung**

#### **7.2.1 Betrachtete Branchen und Annahmen**

Die Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit wurde allgemein für additive Fertigungsverfahren formuliert. Bedingt durch eine Vielzahl an alternativen Verfahren ergeben sich zahlreiche Anwendungsbereiche für die Technologie. Eine pauschale technische Betrachtung von Aufwand und Nutzen bei der Anwendung der Methode ist nicht zielführend, da die Gewichtungen der Entscheidungskriterien sehr unterschiedlich sein können.

Zur Bewertung sollen deshalb vier exemplarisch ausgewählte Branchen betrachtet werden, welche eine große Bandbreite an gefertigten Stückzahlen und mit den Werkstücken verbundenen Qualitätsanforderungen aufweisen. Nach WOHLERS (2010) sind die drei am meisten von der additiven Fertigung profitierenden Industriezweige die Konsumgüterindustrie, die Automobilbranche und die Medizin- und Dentalbranche. Diese sollen nachfolgend betrachtet werden. Zusätzlich wurde die im Jahr 2010 noch auf dem 5. Platz befindliche Luft- und Raumfahrtbranche (WOHLERS 2010) für die technische Bewertung ausgewählt, da in dieser unter der Annahme einer erfolgreichen Zertifizierung additiv gefertigter Werkstücke, z. B. für den Triebwerksbau, von einer zukünftig steigenden Bedeutung

## 7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

ausgegangen werden kann. Abbildung 49 verdeutlicht schematisch die mit den ausgewählten Branchen verbundenen Qualitätsanforderungen an die Werkstücke und die gefertigten Stückzahlen.

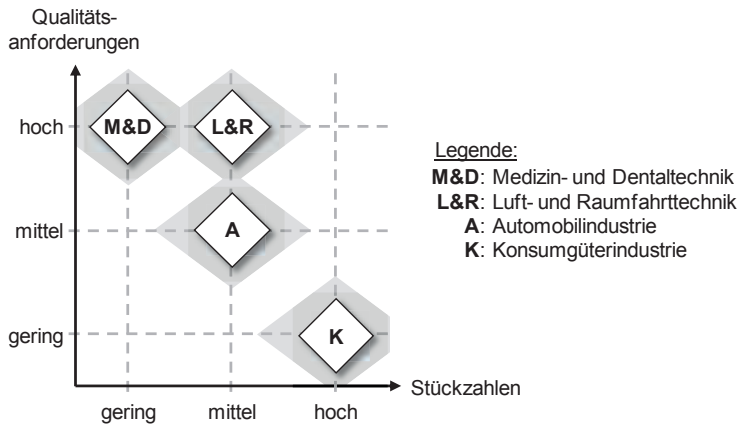


Abbildung 49: Betrachtete Branchen und Annahmen hinsichtlich Stückzahlen und Qualitätsanforderungen

Sowohl die Qualitätsanforderungen als auch die Stückzahlen wurden in die Kategorien *hoch*, *mittel* und *gering* untergliedert. Eine pauschale Eingruppierung einer gesamten Branche in eine Kategorie ist nicht in allen Fällen möglich. Für die folgende technische Bewertung wird jedoch davon ausgegangen, dass die Hauptanwendungen innerhalb der Branche die Eingruppierungen jeweils erfüllen, d. h., dass die Mehrheit der Anwendungsbereiche innerhalb der Branche die angenommenen Kategorien von Stückzahl und Qualitätsanforderungen aufweist. Die Eingruppierung kann nur einen aktuellen Stand widerspiegeln. Über künftige Entwicklungen sollen zu diesem Zeitpunkt keine Prognosen erstellt werden.

### 7.2.2 Anwendung in der Konsumgüterindustrie

Die Konsumgüterindustrie ist vorwiegend geprägt von einer hohen zu fertigenden Stückzahl und nur geringen Qualitätsanforderungen an die Werkstücke. Das Hauptziel, die Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung, erscheint für diese Branche als nur eingeschränkt relevant. Aufgrund der besonders in der Konsumgüterindustrie geringen Produkteinführungszeit sind die Hersteller jedoch unter Umständen mit der Forderung nach einer kurzen Lieferzeit konfrontiert. Dann kann es notwendig werden, einen Fertigungsauftrag auf mehrere

Maschinen zu verteilen und die Produktion dadurch zeitlich zu parallelisieren. Unter der Annahme, dass die Fertigungssysteme aufgrund der Maschinencharakteristik eine unterschiedliche Prozessfähigkeit aufweisen, ist mit schwankenden Prozessergebnissen innerhalb des Fertigungsloses zu rechnen. Wie in der Anwendung in Kapitel 6 demonstriert, kommt es auch innerhalb eines Fertigungssystems zu einer Verteilung der Werkstückmerkmale, welche trotz der geringen Anforderungen evtl. nicht mehr toleriert werden kann. Durch die Berücksichtigung der Maschinencharakteristik kann eine Homogenisierung erzielt und dadurch eine bessere Ausnutzung des vorhandenen Bauraumes erreicht werden.

### 7.2.3 Anwendung in der Medizin- und Dentalbranche

Die Medizin- und Dentalbranche bildet das Gegenstück zur Konsumgüterindustrie, da vorwiegend nur geringe Stückzahlen gefertigt werden, welche jedoch hohen Anforderungen genügen müssen. Da die Werkstücke meist individuell für einen Patienten generiert werden, ist mehrheitlich von einer Einzelfertigung (Stückzahl 1) auszugehen. Die Anforderungen an die Fertigungsprozesse und Systeme des Qualitätsmanagements für medizinische Produkte sind u. a. in der DIN EN ISO 13485 (2010) festgelegt. Die Erfassung der Maschinencharakteristik kann dabei unterstützen, den hohen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Herstellung von Werkstücken mit gleichbleibender Qualität, auch über die Maschinengrenze hinweg, ist als ein Schlüsselfaktor für den weiteren Erfolg der medizinischen und dentalen Anwendungen anzusehen. Ein weiterer Aspekt in der Nutzung der vorgestellten Methode ergibt sich in der Nachbehandlung der gefertigten Werkstücke. Durch die Kenntnis der Maschinencharakteristik sind angepasste Aufmaßflächen möglich, welche zu einem reduzierten Aufwand in der zumeist manuell durchgeführten Nachbehandlung der Werkstücke führen.

### 7.2.4 Anwendung in der Automobilbranche

Die Automobilbranche befindet sich sowohl mit den Qualitätsanforderungen als auch mit den Stückzahlen zwischen den Medizin- und Dentalprodukten und den Erzeugnissen für die Konsumgüterindustrie. Die Bewertungen hinsichtlich der Notwendigkeit und der Eignung der vorgestellten Methode können somit auf die Automobilbranche übertragen werden. Ein besonderes Charakteristikum der Automobilbranche ist die relativ geringe Fertigungstiefe. Nach Schätzungen des Verbands der Automobilindustrie e. V. betrug diese im Durchschnitt der Unternehmen im Jahr 2007 ca. 21 % an der Gesamtproduktion (VDA 2008). Demnach

## **7 Technische und wirtschaftliche Bewertung**

---

ist die Sicherung der Qualität eine Aufgabe, die in der Verantwortung aller an der Fertigung beteiligten Personen und Organisationseinheiten liegt. Die Kenntnis der Fähigkeit der eingesetzten Prozesse ist hier als eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Zusammenarbeit zu sehen.

### **7.2.5 Anwendung in der Luft- und Raumfahrt**

Die Luft- und Raumfahrt weist mit der Medizin- und Dentalbranche vergleichbar hohe Qualitätsanforderungen, aber höhere Stückzahlen auf. Die Bewertung der Medizin- und Dentalbranche kann auf die Luft- und Raumfahrttechnik übertragen werden, wobei durch die höheren Stückzahlen jedoch noch weitere Aspekte berücksichtigt werden müssen.

Die Vermeidung bzw. Reduzierung von Ausschuss, welcher beispielsweise aus einer ungenügenden Prozessfähigkeit resultiert, ist für die Luft- und Raumfahrttechnik ein besonders anzustrebendes Ziel. Da oft spezielle Materialien mit seltenen Legierungsbestandteilen verwendet werden, kommt es zu hohen Beschaffungskosten und/oder Beschaffungszeiten. Die Erfüllung einer hohen Prozessfähigkeit ist somit auch im Sinne einer hohen Ressourceneffizienz anzustreben.

Neben der Erfüllung einer hohen Prozessfähigkeit ist auch deren Nachweis für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik relevant. DIN EN 9100 (2010) fordert in diesem Zusammenhang Qualität und Sicherheit entlang der gesamten Fertigungsprozesskette.

## **7.3 Wirtschaftliche Bewertung**

### **7.3.1 Allgemeines**

Die Einführung einer neuen Methode kann mit einem finanziellen Aufwand verbunden sein, welcher eine Überprüfung der Investition erforderlich macht. Mithilfe der Amortisationsrechnung kann der benötigte Zeitraum berechnet werden, in dem der finanzielle Aufwand wieder eingebracht werden kann (DÄUMLER 2003). Die Amortisationsrechnung ist ein Verfahren der statischen Investitionsrechnung, d. h., es werden nur gemittelte Aufwände und Erträge ohne Berücksichtigung der Zeitpunkte von Zahlungsströmen berücksichtigt. Die Anforderung bezüglich des für die Amortisation notwendigen Zeitraums unterliegt unternehmensspezifischen Vorgaben. Es kann deshalb keine pauschale Aussage bezüglich der Einführung einer neuen Methode getätigt werden.



Bei der Anwendung der entwickelten Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit können drei grundlegende Nutzenaspekte formuliert werden, durch welche eine frühzeitige Amortisation der für die Einführung und Nutzung der Methode notwendigen Aufwände begünstigt werden kann:

1. Die Möglichkeit zur Herstellung von Werkstücken mit höheren Qualitätsanforderungen kann zu höheren Verkaufserlösen für die Werkstücke führen. Die Amortisationsrechnung unter Berücksichtigung der potenziell höheren Verkaufserlöse wird in Abschnitt 7.3.2 beschrieben.
2. Durch die Möglichkeit zur Homogenisierung der Werkstückqualität sowohl innerhalb eines Fertigungssystems als auch zwischen unterschiedlichen Fertigungssystemen kann Ausschuss vermieden werden. Zur Beschreibung der Amortisationsrechnung unter Berücksichtigung der potenziellen Reduzierung von Ausschuss siehe Abschnitt 7.3.3.
3. Sowohl durch die Erhöhung der Werkstückqualität als auch durch die höhere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse können neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Für ein Unternehmen können sich hieraus strategische Vorteile ergeben, welche jedoch nur eingeschränkt quantifiziert werden können. Für eine ganzheitliche wirtschaftliche Bewertung ist dieses Potenzial jedoch zu berücksichtigen.

### 7.3.2 Amortisation durch höhere Verkaufserlöse

Die wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Methode wird für den in Kapitel 6 erläuterten Anwendungsfall, d. h. die Ermittlung und Rückführung der Maschinencharakteristik zur Reduzierung der z-Schwindung für das Lasersintersystem FORMIGA P 100, durchgeführt. Die Bewertung erfolgt dabei unabhängig von einem konkreten Werkstück. Bei der Anwendung in Kapitel 6 wurde die Maschinencharakteristik in Bezug auf die z-Schwindung erfasst, ausgewertet, formalisiert und in die Prozesskette zurückgekoppelt. Es konnte gezeigt werden, dass die resultierende z-Schwindung reduziert wird und dass ein prinzipieller technischer Nutzen gegeben ist.

Durch die Trennung von Berechnungsformeln und Werten soll das weitere Vorgehen bei der Amortisationsrechnung vom Leser auch für weitere Anwendungsfälle übernommen und an diese angepasst werden können. Die monetären Aufwände können in einmalige und regelmäßig wiederkehrende Aufwände untergliedert werden. Ein einmaliger Aufwand tritt durch die Erfassung und Auswer-

## 7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

---

tung der Maschinencharakteristik auf. Regelmäßig wiederkehrende Aufwände entstehen durch die Rückführung und Nutzung der Maschinencharakteristik.

Tabelle 11 listet den jeweils einmaligen Aufwand für die Herstellung und Auswertung der Probekörper auf. Dieser setzt sich aus den Maschinenkosten, den Materialkosten und den Kosten für die Vermessung und die Formalisierung zusammen. Die Maschinenkosten  $K_M$  setzen sich aus den Dauern der Aufheizphase, der Bauphase und der Abkühlphase und dem Maschinenstundensatz zusammen, welcher nach WARNECKE ET. AL. (1996) ermittelt wurde. Die Berechnung des Maschinenstundensatzes ist aus Tabelle 22 im Anhang unter Abschnitt 10.8 ersichtlich. Die Materialkosten  $K_{MAT}$  setzen sich aus den Kosten für gebundenes Pulver in den Probekörpern und den Aufwendungen für entstandenen Mehrbedarf (durch notwendige Pulverkonditionierung wie Auffrischung oder Siebverluste) zusammen. Sie beliefen sich auf 371,53 € pro Bauprozess. Die Kosten für die Vermessung der Probekörper  $K_V$  resultieren aus der Beauftragung eines Messdienstleisters. Durch ein standardisiertes Format der Messdaten können diese aufwandsarm formalisiert werden. Die Kosten hierfür belaufen sich auf angenommene 60,00 € pro Bauprozess. Die Einmalkosten summieren sich auf insgesamt 1.797,25 € pro Bauprozess.

Tabelle 11: Ermittlung der einmaligen Aufwände für die Erfassung und Auswertung der Maschinencharakteristik für die z-Schwindung mittels 63 Probekörpern

Kostenart bzw. relevante Größe	Formelzeichen bzw. Formel	Einheit	Kosten
Dauer der Aufheizphase	$t_{HU}$	h	3
Dauer der Bauphase	$t_B$	h	8
Dauer der Abkühlphase	$t_{CD}$	h	8
Maschinenstundensatz	$K_{MH}$	€/h	22,14
<b>Maschinenkosten</b>	<b><math>K_M = (t_{HU} + t_B + t_{CD}) \cdot K_{MH}</math></b>	<b>€</b>	<b>420,72</b>
Materialpreis	$P_{MAT}$	€/kg	65,00
Materialauffrischrate <sup>2</sup>	$R_A$	%	50
Materialverlustfaktor <sup>3</sup>	$V_{MAT}$	%	5
Dichte (gesintert)	$D_S$	g/cm <sup>3</sup>	0,93
Dichte (Pulver)	$D_P$	g/cm <sup>3</sup>	0,47
Volumen des Probekörpers	$V_{FK}$	cm <sup>3</sup>	46,66
Masse des Probekörpers	$m_{FK} = V_{FK} \cdot D_S$	g	43
Anzahl der Probekörper	$q_{FK}$	-	63
Materialkosten der Probekörper	$K_{MAT,PK} = n_{FK} \cdot m_{FK} \cdot P_{MAT}$	€	177,68
Volumen des gesamten Baujobs	$V_{BJ}$	cm <sup>3</sup>	14.600
Materialkosten durch verlorenes Pulver	$K_{MAT,P} = (V_{BJ} - q_{FK} \cdot V_{FK}) \cdot (R_A + V_{MAT}) \cdot D_P \cdot P_{MAT}$	€	193,84
<b>Materialkosten gesamt</b>	<b><math>K_{MAT} = K_{MAT,PK} + K_{MAT,P}</math></b>	<b>€</b>	<b>371,53</b>
Kosten der Vermessung pro Probekörper (extern)	$K_{VM,PK}$	€/Stück	15,00
<b>Kosten der Vermessung gesamt</b>	<b><math>K_{VM} = K_{VM,PK} \cdot q_{FK}</math></b>	<b>€</b>	<b>945,00</b>
Aufwand für Formalisierung	$t_F$	h	1
Personalkostensatz	$K_{FH}$	€/h	60,00
<b>Kosten der Formalisierung</b>	<b><math>K_F = t_F \cdot K_{FH}</math></b>	<b>€</b>	<b>60,00</b>
<b>Summe der Einmalkosten</b>	<b><math>K_E = K_M + K_{MAT} + K_{VM} + K_F</math></b>	<b>€</b>	<b>1.797,25</b>

Regelmäßig wiederkehrende Aufwände entstehen bei der Nutzung der Maschinencharakteristik zur Reduzierung der z-Schwindung durch die für die Vordeformation benötigte Zeit  $T_{Vordef}$  sowie durch die durch zusätzlichen Dokumentationsaufwand benötigte Zeit  $T_{Doku}$ . Die Aufwände fallen für jeden Bauprozess in

<sup>2</sup> Die Materialauffrischrate gibt an, wie viel Prozent Massenanteile an Neupulver verwendet werden sollte, um Nachteile durch die Pulveralterung zu vermeiden.

<sup>3</sup> Der Materialverlustfaktor gibt an, um wie viel Prozent des nicht verfestigten Materials der Bedarf durch Verunreinigungen und Reinigungsverluste erhöht wird.

## 7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

der Phase der Bauvorbereitung an. Tabelle 12 gibt die Summe der regelmäßigen Aufwände  $K_R$  für zwei Szenarien wieder.

Das Szenario *Aktueller Entwicklungsstand* verdeutlicht die Möglichkeiten der derzeitigen softwaretechnischen Umsetzung, wonach die Vordeformation eines Werkstücks auf einem Standard-PC mit 2 GB Arbeitsspeicher und 2,53 GHz Prozessorleistung ca. 120 Sekunden benötigt. Das Szenario *Serienentwicklung* basiert auf der Annahme, dass durch eine gezielte Optimierung der Performanz eine deutliche Reduzierung der hierfür benötigten Zeit erreicht werden kann. Durch die kontinuierliche Leistungssteigerung der Rechensysteme ist zudem zukünftig von einer verkürzten Rechenzeit auszugehen. Ferner umfasst die serientaugliche Umsetzung eine Funktion zur automatisierten Anfertigung einer Dokumentation, wodurch die Aufwendungen für diese entfallen können ( $T_{Doku} = 0$ ). Bei den Bauprozessen wird davon ausgegangen, dass sie mit einer durchschnittlichen Anzahl  $q$  von 50 unterschiedlichen Werkstücken versehen sind. Für die derzeitige Umsetzung entstanden regelmäßige Aufwände  $K_R$  in Höhe von 160,00 € pro Bauprozess bzw. regelmäßige Aufwände in Höhe von 3,20 € pro Werkstück. Auf Basis der erläuterten Annahmen waren für eine Serienentwicklung regelmäßige Aufwände in Höhe von 10,00 € pro Bauprozess bzw. 0,20 € pro Werkstück zu kalkulieren.

Tabelle 12: Ermittlung der regelmäßigen Aufwände für die Rückführung der Maschinencharakteristik für die z-Schwindung

Kostenart bzw. relevante Größe	Formelzeichen bzw. Formel	Einheit	Szenario Aktueller Entwicklungsstand	Szenario Serienentwicklung
Personalkostensatz	$K_{PH}$	€/h	60,00	60,00
Durchschnittliche Anzahl an Werkstücken pro Bauprozess	$q$	-	50	50
Dauer für die Vordeformation pro Werkstück	$t_{Vordef}$	s	120	12
Zusätzlicher Aufwand für die Dokumentation	$t_{Doku}$	h	1	-
<b>Summe der regelmäßigen Aufwände pro Bauprozess</b>	$K_R = (q \cdot t_{Vordef} + t_{Doku}) \cdot K_{PH}$	€	<b>160,00</b>	<b>10,00</b>
<b>Summe der regelmäßigen Aufwände pro Werkstück</b>	$K_{R,WS} = K_R / q$	€	<b>3,20</b>	<b>0,20</b>

Der allgemeine monetäre Nutzen durch eine Reduzierung der z-Schwindung ist nur eingeschränkt bestimmbar. Es wird davon ausgegangen, dass durch die Bereitstellung einer höheren Qualität der Werkstücke ein höherer Verkaufserlös

erzielt werden kann. Die Erhöhung des Verkaufserlöses pro Bauprozess  $E_{BP}$  kann der Amortisation der einmaligen Aufwände  $K_E$  zugeführt werden. Die Anzahl der hierfür notwendigen Bauprozesse  $n_{BP}$  kann nach Gleichung (21) bestimmt werden:

$$n_{BP} = \frac{K_E}{E_{BP} - K_R} \quad (21)$$

Abbildung 50 zeigt den Zusammenhang zwischen der Erhöhung des Verkaufserlöses pro Werkstück  $E_{WS} = E_{BP}/n$  und der für die Amortisation notwendigen Anzahl an Bauprozessen  $n_{BP}$ . Es wird deutlich, dass durch den aktuellen Entwicklungsstand der softwaretechnischen Umsetzung bei einer Erhöhung des Verkaufserlöses pro Werkstück von 4,20 € eine Amortisation nach 50 Bauprozessen erzielt werden kann. Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, dass pro Tag ein Bauprozess durchführbar ist, die Amortisation somit nach 50 Tagen erreicht ist. Beim Szenario *Serienentwicklung* ist bei identischer Amortisationszeit lediglich eine Erhöhung des Verkaufserlöses pro Werkstück von 1,20 € notwendig. Unterschreitet  $E_{WS}$  den Wert von  $K_{R,WS}$ , so kann keine Amortisation erreicht werden. Dies bedeutet, dass die Investition durch die Einführung und Nutzung der Methode dauerhaft unwirtschaftlich bleibt.

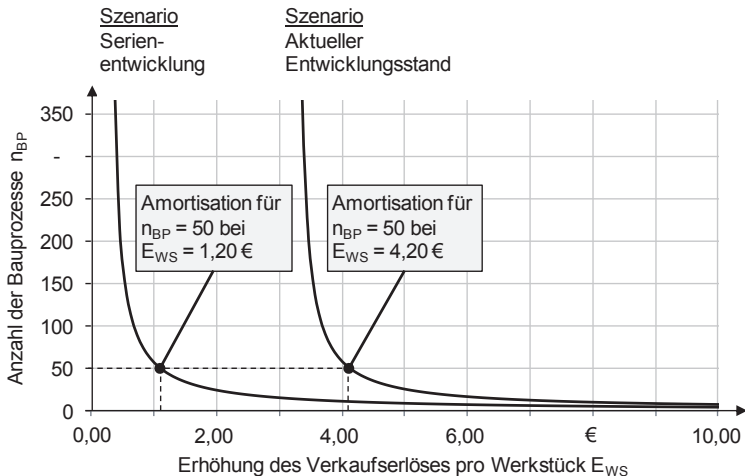


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen der Erhöhung des Verkaufserlöses pro Werkstück und der resultierenden Anzahl an Bauprozessen zur Amortisation der Investition

### 7.3.3 Amortisation durch Reduzierung von Ausschuss

Nach der zuvor beschriebenen werkstückunabhängigen Amortisationsrechnung sollen nachfolgend die Auswirkungen der Anwendung der Methode auf die Herstellung eines ausgewählten Werkstücks untersucht werden. Das Werkstück weist die äußeren Abmessungen von  $317 \times 76 \times 41 \text{ mm}$  auf. Bei dem Werkstück handelt es sich um einen Bestandteil eines Modellbauroboters, welcher in einer nur geringen Stückzahl produziert wird. Eine Fertigung des Werkstückes mittels Lasersintern erscheint geeignet, da die Anforderungen hinsichtlich Kosten und mechanischer Belastbarkeit durch das Verfahren erfüllt werden können. Zur effizienten Bauraumnutzung ist eine Orientierung nach Abbildung 51 (a) zweckmäßig, da hierdurch in der untersuchten Anlage FORMIGA P 100 des Herstellers EOS GmbH Electro Optical Systems insgesamt 12 Werkstücke pro Bauprozess gefertigt werden können.

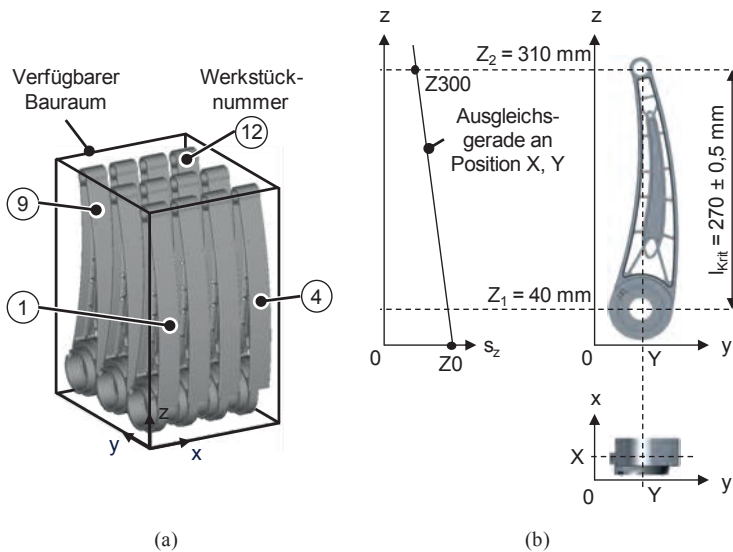


Abbildung 51: Ausgewähltes Referenzwerkstück mit Positionierung im Bauraum (a) und Bestimmung der an einem Werkstück auftretenden  $z$ -Schwindung (b)

Bedingt durch die in Abschnitt 6.4.5 (ab Seite 97) beschriebene Untersuchung der  $z$ -Schwindung kommt es an dem Werkstück zu Abweichungen von der Sollgeometrie. Zudem führt die bisherige lineare Schwindungskompensation in  $z$ -

Richtung zu einer positionsabhängigen Unter- bzw. Überkompensation. In den Anforderungen an das Werkstück wird für Längenmaße die Toleranzklasse *mittel* nach DIN ISO 2768-1 (1991b) gefordert. Für das Maß der als kritisch vermerkten Länge  $l_{krit}$  muss ein Intervall von  $270 \pm 0,5 \text{ mm}$  erreicht werden (vgl. Abbildung 51 (b)). Vor dem Herstellprozess ist es als zweckmäßig anzusehen, die zu erwartende Maßhaltigkeit des Längenmaßes zu überprüfen. Dafür ist eine Prüfung zweckmäßig, ob durch die in Abschnitt 6.6 (ab Seite 111) beschriebene Rückführung der Maschinencharakteristik in die Fertigung das Werkstück prozesssicherer gefertigt werden kann.

Mithilfe der Gleichung (18) (vgl. Seite 104) kann die Auswirkung der z-Schwindung auf das Längenmaß für jedes einzelne Werkstück bestimmt werden. Die Werte  $Z_0$  und  $Z_{300}$  werden aus den Ausgleichsgeraden interpoliert, welche durch die Probekörper bereits bekannt sind (vgl. Tabelle 17 und Tabelle 19 im Anhang unter Abschnitt 10.5). Tabelle 13 listet die ermittelten Ausgleichsgeraden jedes Werkstücks sowohl vor als auch nach der Rückführung der Maschinencharakteristik auf.

## 7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Tabelle 13: Interpolierte Ausgleichsgeraden für die z-Schwindung pro Werkstück

Werkstück- nummer	Vor Rückführung der Maschinencharakteristik		Nach Rückführung der Maschinencharakteristik	
	Z0 [%]	Z300 [%]	Z0 [%]	Z300 [%]
1	2,22	1,59	2,28	1,54
2	2,36	1,70	2,26	1,55
3	2,41	1,70	2,20	1,60
4	2,36	1,62	2,17	1,63
5	2,30	1,75	2,34	1,61
6	2,39	1,87	2,34	1,60
7	2,38	1,86	2,25	1,63
8	2,31	1,75	2,22	1,65
9	2,45	1,80	2,21	1,66
10	2,50	1,86	2,16	1,67
11	2,51	1,84	2,05	1,69
12	2,44	1,76	2,04	1,71
<b>Standard- wert [%]</b>	<b>2,20</b>	<b>1,60</b>	<b>2,20</b>	<b>1,60</b>
<b>Mittlere Abwei- chung zum Standardwert [%]</b>	<b>0,19</b>	<b>0,16</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>

Der positive Effekt der Rückführung der Maschinencharakteristik ist daran zu erkennen, dass die Werte Z0 und Z300 der Ausgleichsgeraden eine geringere mittlere Abweichung von den Standardwerten  $Z0 = 2,20\%$  und  $Z300 = 1,60\%$  aufweisen als dies ohne Rückführung der Maschinencharakteristik der Fall ist. Dies bedeutet, dass die Schwindung im Bauraum des untersuchten Systems nach Rückführung der Maschinencharakteristik eine homogenere Verteilung aufweist und diese durch die linear interpolierende Kompensation der z-Schwindung besser ausgeglichen werden kann. Durch die Vordeformation der digitalen Werkstückdaten wird die bisherige Kompensation der z-Schwindung nicht ersetzt, sondern unterstützt.



Abbildung 52 zeigt die Werte für das Längenmaß  $l_{krit}$ , welche vor und nach Rückführung der Maschinencharakteristik zu erwarten sind. Während unter Vernachlässigung der Maschinencharakteristik sechs Werkstücke einen zulässigen Wert aufwiesen, befanden sich nach der Rückführung der Maschinencharakteristik alle zwölf Werkstücke im zulässigen Bereich. Die Anzahl der Ausschussteile konnte somit von sechs auf null reduziert werden.

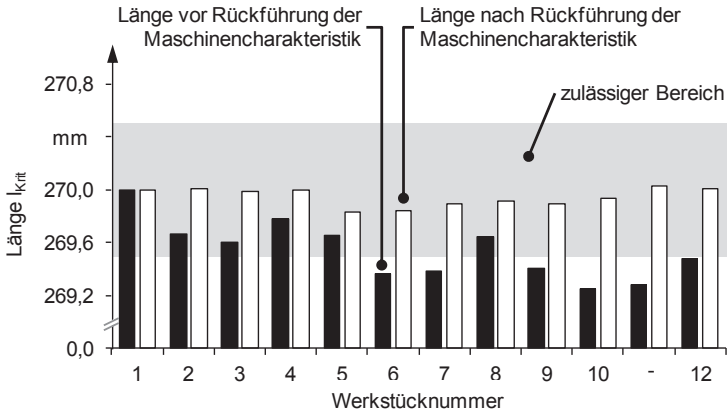


Abbildung 52: Vergleich der Maßhaltigkeit vor (schwarz) und nach Rückführung der Maschinencharakteristik (weiß)

Für den Anwender der Methode ergeben sich zwei potenzielle Vorteile. Durch die Auswertung der Maschinencharakteristik kann einerseits vorab überprüft werden, ob ein Werkstück aufgrund seiner Positionierung ein gefordertes Maß einhalten wird. Dadurch kann die Produktion von Ausschussteilen reduziert und der frei werdende Bauraum für Werkstücke mit geringeren Qualitätsanforderungen verwendet werden. Zudem ist es möglich, dass durch die zusätzliche Rückführung der Maschinencharakteristik eine gleichmäßigere Verteilung von Werkstückmerkmalen erreicht werden kann. Dies bewirkt, dass der zur Verfügung stehende Bauraum effizienter ausgenutzt werden kann und dadurch eine wirtschaftlichere Fertigung möglich ist. Die Berücksichtigung der Maschinencharakteristik ist jedoch mit einem Aufwand verbunden, welcher Auswirkungen auf die Amortisation hat. Zur einmaligen Erfassung der Maschinencharakteristik entstanden nach Tabelle 11 Kosten in Höhe von 1.797,25 €. Für den vorstehend dargestellten Bauprozess nach Abbildung 51 (a) fiel für die Berücksichtigung der Maschinencharakteristik für den aktuellen Entwicklungsstand der softwaretechnischen Umsetzung ein monetärer Aufwand an, welcher nach Gleichung (22)

## 7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

---

bestimmt werden kann. Die Gleichung basiert auf Tabelle 12 (vgl. Seite 128) für  $q = 12$  Werkstücke:

$$K_R = (q \cdot t_{\text{Vordef}} + t_{\text{Doku}}) \cdot K_{PH} =$$
$$K_R = (12 \cdot 120 \text{ s} + 1 \text{ h}) \cdot 60 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 84,00\text{€} \quad (22)$$

Setzt man die Kosten zur Berücksichtigung der Maschinencharakteristik für den beschriebenen Bauprozess ins Verhältnis zu den einmaligen Kosten zur Erfassung der Maschinencharakteristik, so ergab sich für die Bewertung ein Amortisationsanteil von  $84,00 \text{ €} / 1797,25 \text{ €} = 5 \%$ . Dies bedeutet, dass alleine durch den beschriebenen Bauprozess 5 % der einmaligen Aufwände für die Erfassung und die Auswertung der Maschinencharakteristik amortisiert werden konnten. Unter der Annahme einer langfristigen Anwendung der Methode wäre somit eine vollständige Amortisation möglich.

### 7.4 Zusammenfassung

Im Rahmen der technischen Bewertung wurde dargelegt, dass die Nutzung der Methode in den Branchen *Konsumgüterindustrie*, *Medizin- und Dentaltechnik*, *Automobilindustrie* sowie *Luft- und Raumfahrttechnik* als vorteilhaft angesehen werden kann. Die gewählten Branchen weisen ein breites Spektrum hinsichtlich der Anzahl der gefertigten Werkstücke, sowie der damit verbundenen Qualitätsanforderungen auf. Bei Fertigungsszenarien mit hohen Stückzahlen ergeben sich durch die Möglichkeit einer parallelen Fertigung und unter Einhaltung der geforderten Prozessfähigkeit Vorteile. Ebenso kann bei Einzelstückfertigungen der Ausschussanteil reduziert werden. Anwendungen mit hohen Qualitätsanforderungen können von der Nutzung der Methode profitieren, indem die Prozessfähigkeit nachgewiesen werden kann.

Die wirtschaftliche Bewertung der in Kapitel 6 demonstrierten Anwendung der Methode für die Reduzierung der z-Schwindung beim Lasersintern hat ergeben, dass eine Amortisation mit einer nur geringfügigen Erhöhung des Verkaufserlöses pro Werkstück erzielt werden kann. Unter der Annahme weiterer Verbesserungsmaßnahmen an der softwaretechnischen Umsetzung kann auch dieser Aufwand stark reduziert und dadurch die Kundenakzeptanz gesteigert werden. Anhand eines exemplarischen Werkstücks konnte aufgezeigt werden, dass die Amortisation der Investition auch durch eine Reduzierung von Ausschuss möglich ist. Der Anteil an Ausschussteilen konnte beim gewählten Beispiel durch die

Rückführung der Maschinencharakteristik von 50 % auf 0 % gesenkt werden. Durch den exemplarischen Bauprozess konnte bereits ein Teil der Investition amortisiert werden.



## 8 Schlussbetrachtung

### 8.1 Zusammenfassung der Arbeit

Die Situation der Produktionstechnik in Deutschland ist von einer Umgestaltung auf flexible Produktionsstrukturen gekennzeichnet. Ursächlich hierfür sind vorherrschende Trends wie die Forderung nach einer hohen Variantenvielfalt, wodurch die Stückzahlen gleichartiger Werkstücke sinken. Die schnelle und wirtschaftliche Herstellung von kundenindividuellen Werkstücken versetzt Unternehmen in die Lage, neue Produkte zeitnah am Markt zu platzieren und im turbulenten Umfeld zu bestehen. Die additive Fertigung kann als ein Lösungsbaustein zur Erfüllung der vorstehend genannten Herausforderungen angesehen werden. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war die Erhöhung der Prozessfähigkeit additiver Fertigungsverfahren durch die Erweiterung bereits bestehender Maßnahmen zur Prozessoptimierung um die Berücksichtigung des charakteristischen Verhaltens einzelner Maschinen.

Einführend war es hierfür in Kapitel 2 notwendig, die Grundlagen im Bereich der additiven Fertigung zu erläutern. Dabei wurden durch eine systemtechnische Analyse der Aufbau und die Funktion der relevanten Komponenten eines additiven Fertigungssystems beschrieben sowie der Prozessablauf und die Möglichkeiten zur Nutzung der Werkstücke im Produktlebenszyklus erläutert. Zudem wurden die Grundlagen zur Bestimmung und Quantifizierung von Fähigkeitswerten dargelegt.

Im Kapitel 3 wurde der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Gestaltabweichungen additiv gefertigter Werkstücke, die Einflussfaktoren auf die Prozessfähigkeit und die Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessfähigkeit diskutiert. Unzulänglichkeiten, welche sich auf die Werkstücke auswirken, wurden in Form der auch für konventionelle Fertigungsverfahren verwendeten Gestaltabweichungen nach DIN 4760 (1982) angegeben. Ausgehend von den aktuell noch vorhandenen Defiziten wurden potenzielle Faktoren beleuchtet, welche einen Einfluss auf die Prozessfähigkeit ausüben können. Die Untergliederung erfolgte dabei in die Bereiche *Mensch, Methode, Maschine, Material* und *Milieu*. Abschließend erfolgte in Kapitel 3 die Beschreibung bestehender Maßnahmen, durch welche eine Erhöhung der Prozessfähigkeit erzielt werden kann.

Ausgehend vom aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik wurde in Kapitel 4 der resultierende Handlungsbedarf aufgezeigt. Hierbei konnte festgestellt wer-

den, dass die vorhandenen Ansätze vorwiegend eine globale Betrachtung des Prozesses und des Fertigungssystems verfolgen, d. h. dass ein besonderes Verhalten der am Prozess beteiligten Komponenten in der bisherigen Prozesskette keine Berücksichtigung findet. Obgleich das charakteristische Verhalten in einer Vielzahl von Forschungsarbeiten als existent bezeichnet wurde, war bislang keine ganzheitliche Methode verfügbar, durch welche dieses Berücksichtigung finden konnte.

Es wurde deshalb in Kapitel 5 eine Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung vorgestellt. Das Ziel der Methode ist die Erfassung, Abbildung, Bewertung und optionale Rückführung der Maschinencharakteristik in die Prozesskette zur additiven Fertigung, um eine Berücksichtigung des besonderen Verhaltens des Fertigungssystems zu erreichen. Die Methode umfasst die Aufnahme von Daten unterschiedlicher Quellen und führt diese über eine Formalisierung der Maschinencharakteristik zu. Abhängig von der Relevanz der Maschinencharakteristik für eine bestimmte Anwendung kann eine Rückführung in bereits vorhandene Ansätze zur Prozessoptimierung oder direkt in die Prozesskette zur additiven Fertigung vollzogen werden.

Die entwickelte Methode wurde allgemein für die additive Fertigung formuliert. Ihre Anwendung wurde in Kapitel 6 am Beispiel des Verfahrens *Lasersintern* demonstriert. Bei dem untersuchten Maschinensystem handelte es sich um eine FORMIGA P 100 des Herstellers EOS GmbH Electro Optical Systems. Einführend wurde eine Analyse des für die Schwindung ursächlichen thermischen Verhaltens durchgeführt. Zur Erfassung der Schwindung in x-, y- und z-Richtung wurden geeignete Probekörper entwickelt und die jeweils resultierende Prozessfähigkeit in Form von Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768-1 (1991b) bewertet. Die Rückführung der Maschinencharakteristik wurde exemplarisch anhand der z-Schwindung demonstriert. Dabei wurden das Vorgehen sowie die dabei erzielbare Erhöhung der Prozessfähigkeit beschrieben.

Abschließend wurde in Kapitel 7 eine technische und wirtschaftliche Bewertung der entwickelten Methode vorgenommen. Im Rahmen der technischen Bewertung wurden die Vorteile durch die Nutzung der Methode in den Branchen Konsumgüterindustrie, Medizin- und Dentaltechnik, Automobilindustrie sowie Luft- und Raumfahrttechnik herausgearbeitet. Die Branchen wurden dabei basierend auf ihrer aktuellen und potenziell zukünftigen wirtschaftlichen Relevanz ausgewählt. Bei Anwendungsbereichen mit hohen Stückzahlen kann ein Vorteil durch die Möglichkeit einer Parallelisierung der Fertigung erzielt werden. Unter ande-

rem Einzelstückfertigungen profitieren durch eine potenzielle Reduzierung des Ausschussanteils von der Nutzung der Methode.

Die wirtschaftliche Bewertung wurde für die in Kapitel 6 demonstrierte Anwendung der Methode für die Reduzierung der z-Schwindung beim Lasersintern durchgeführt. Eine Amortisation der für die Einführung und Nutzung der Methode notwendigen Investition kann dabei mit einer nur geringfügigen Erhöhung des Verkaufserlöses pro Werkstück erzielt werden. Unter der Annahme zukünftiger Weiterentwicklungen der softwaretechnischen Umsetzung kann der positive Nutzen zudem noch weiter gesteigert werden. Zudem ist eine Amortisation der Investition durch die Reduzierung von Ausschuss möglich.

## 8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet durch die Einführung einer Methode zur maschinenspezifischen Erhöhung der Prozessfähigkeit einen Beitrag zur Weiterentwicklung der additiven Fertigungsverfahren und zur fortführenden Etablierung derselben in der Produktionstechnik. Die entwickelte Methode stellt ein Grundgerüst dar, welches zur Lösung bzw. Reduzierung einer Vielzahl an Problemen angewendet werden kann. Gleichwohl ist es notwendig, die Methode durch weitere Forschungsarbeiten für konkrete Anwendungsfälle zu qualifizieren.

Ein dringender Handlungsbedarf besteht in der weiteren Nutzung bereits vorhandenen Wissens für die Anwendung der präsentierten Methode. Durch eine Vielzahl an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden die Zusammenhänge zwischen Steuergrößen und Ausgangsgrößen für unterschiedliche Prozesse ermittelt. Durch eine Formalisierung dieser Zusammenhänge besteht die Möglichkeit, dieses Wissen auch in der dargestellten Form zu nutzen. Ebenso sind weitere Untersuchungen sinnvoll, um die Beobachtbarkeit und die Steuerbarkeit bestimmter Merkmale zu ermitteln. Nur bei steuerbaren und beobachtbaren Merkmalen ist es möglich, eine Maschinencharakteristik zu erfassen, auszuwerten und zur Erhöhung der Prozessfähigkeit wieder zurückzuführen.

Allgemein ist es als sinnvoll zu bezeichnen, wenn die Charakteristik eines Fertigungssystems bei zukünftigen Experimenten berücksichtigt wird. Der potenzielle Einfluss der Maschinencharakteristik auf ein zu untersuchendes Merkmal ist vorab festzustellen. Dies steigert zwar zwangsläufig den Aufwand zur Durchführung der Experimente, erhöht jedoch auch die Möglichkeit zur Übertragung der Ergebnisse auf weitere Fertigungssysteme. Der positive Effekt sollte die Aufwendungen somit kompensieren.

## 8 Schlussbetrachtung

---

Die exemplarische Anwendung der Methode erfolgte in dieser Arbeit für das Verfahren Lasersintern. Das für den Nachweis der Prozessfähigkeit (basierend auf der Maßhaltigkeit) eingesetzte Prüfmittel wies dabei eine nur geringe Fähigkeit auf. Dies ist hauptsächlich auf die hohe Oberflächenrauheit zurückzuführen, welche ein prozesssicheres Vermessen stark eingeschränkt. Im Rahmen weiterer Arbeiten kann untersucht werden, ob diese Prüfmittelfähigkeit durch eine Nachbehandlung der Probekörper (z. B. eine Verringerung der Rauheit) verbessert werden kann. Durch eine bessere Prüfmittelfähigkeit wäre es dann evtl. auch möglich, die Positionsabhängigkeit der Schwindung in der  $x$ - und der  $y$ -Richtung zu erfassen und zu kompensieren. Zudem beruht die derzeitige Umsetzung der Schwindungskompensation (basierend auf der Freiformdeformation) auf einer von der Form des Werkstücks unabhängigen Anpassung der digitalen Werkstückdaten. Ob durch eine Berücksichtigung bestimmter Werkstückmerkmale (z. B. massive Bereiche, dünne Bereiche) bei der Vordeformation eine weitere Verbesserung erreicht werden kann, ist im Rahmen zukünftiger Arbeiten zu demonstrieren.

Ein visionäres Ziel ist die Weiterentwicklung der Fertigungssysteme in der Hinsicht, dass die die Maschinencharakteristik hervorruhenden Größen in einer zukünftigen Prozessregelung direkt Berücksichtigung finden. Eine separate Erfassung, Auswertung und Rückführung wäre damit nicht mehr notwendig. Da dies jedoch mit erheblichen Aufwendungen verbunden ist, bleibt die Realisierung einer solchen Prozessregelung Aufgabe weiterer Entwicklungen und Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet.



## 9 Literaturverzeichnis

ABEL 2011

Abel, J.: Die flexible Produktion. München: mi-Fachverlag 2011. ISBN: 978-3-86880-127-9.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3-44642-595-8.

AKHTAR ET AL. 2003

Akhtar, S.; Wright, C. S.; Youseffi, M.; Hauser, C.; Childs, T. H. C.; Taylor, C. M.; Baddrossamay, M.; Xie, J.; Fox, P.; O'Neill, W.: Direct Selective Laser Sintering of Tool Steel Powders to High Density. Part B: The Effect on Microstructural Evolution. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 14th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 04.-06. August 2003: The University of Texas at Austin 2003, S. 656–667.

ALSCHER 2000

Alscher, G.: Das Verhalten teilkristalliner Thermoplaste beim Lasersintern. Diss. Universität Essen (2000). Zugl. Aachen: Shaker 2000. ISBN: 978-3-8265-8106-9.

ASTM F2792 2010

ASTM F2792: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Berlin: Beuth 2010.

ASTM F2915 2011

ASTM F2915: Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF). Berlin: Beuth 2011.

AZARI & NIKZAD 2009

Azari, A.; Nikzad, S.: The evolution of rapid prototyping in dentistry: a review. Rapid Prototyping Journal 15 (2009) 3, S. 216–225.

BERUMEN ET AL. 2012

Berumen, S.; Bechmann, F.; Craeghs, T.: Quality control system for the coating process in laser- and powder bed-based additive manufacturing technologies. In: Demmer, A. (Hrsg.): Direct Digital Manufacturing Fraunhofer Conference. Berlin: [ohne Verlagsnennung] 2012.

BMBF 2011

BMBF: Innovationsverhalten der Deutschen Wirtschaft. Mannheim: [ohne Verlagsnennung] 2011.

BOGNER ET AL. 2005

Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: Das Experteninterview. 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2005. ISBN: 978-3-531-14447-4.

## 9 Literaturverzeichnis

---

### BRAJLIH ET AL. 2006

Brajlih, T.; Drstvensek, I.; Valentan, B.; Balic, J.: Improving the Accuracy of Rapid Prototyping Procedures by Genetic Programming. In: Kyttner, R. (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Conference of DAAAM Baltic. Wien, 20.-22. April 2006: DAAAM International 2006, S. 113-116. ISBN: 978-9985-894-92-7.

### BRANNER 2011

Branner, G.: Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren. Diss. Technische Universität München (2010). Zugl. München: Utz 2011. ISBN: 978-3-83164-071-3.

### BROMME 1996

Bromme, A.: Der Einfluß des Tastelementradius bei der Messung von Geometriemerkmalen. Diss. Technische Universität Chemnitz (1996).

### BUCHBINDER ET AL. 2011

Buchbinder, D.; Schilling, G.; Meiners, W.; Pirch, N.; Wissenbach, K.: Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM. RTjournal – Forum für Rapid Technologie 8 (2011) 1, S. 1–25.

### BURGER 2008

Burger, A.: Zum Erhalt der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit bei Diskretisierung dynamischer Systeme. Diss. Universität Kassel (2008). Zugl. Kassel: Kassel University Press 2008. ISBN: 978-3-89958-452-3.

### CELI 1995

Celi, I.: Stereolithographie. Diss. RWTH Aachen (1995). Zugl. Aachen: Shaker 1995. ISBN: 3-8265-0984-6.

### CHENG ET AL. 1995

Cheng, W.; Fuh, J. Y.; Nee, A. Y. C.; Wong, Y. S.; Loh, H. T.; Miyazawa, T.: Multi-objective optimization of partbuilding orientation in stereolithography. Rapid Prototyping Journal 1 (1995) 4, S. 12–23.

### COLANI ET AL. 2011

Colani, L.; Feldhusen, J.; Majschak, J.-P.; Schürmann, H.: Grundlagen der Konstruktionstechnik. In: Grothe, K.-H. et al. (Hrsg.): Dubbel. Berlin: Springer 2011, S. F1-F51. ISBN: 978-3-642-17305-9.

### COREMANS 1999

Coremans, A. L.: Laserstrahlsintern von Metallpulver. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (1998). Zugl. Bamberg: Meisenbach 1999. ISBN: 978-3-87525-124-1.

### CRAEGHS ET AL. 2011

Craeghs, T.; Clijsters, S.; Yasa, E.; Kruth, J.-P.: Online Quality Control of Selective Laser Melting. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 08.-10. August 2011: The University of Texas at Austin 2011.

---

DANJOU 2010

Danjou, S.: Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). Zugl. Göttingen: Cuvillier 2010. ISBN: 978-3-86955-534-8.

DAO ET AL. 1999

Dao, Q.; Frimodig, J. C.; Le, H. N.; Li, X.-Z.; Putnam, S. B.; Golda, K.; Foyos, J.; Noorani, R.; Fritz, B.: Calculation of shrinkage compensation factors for rapid prototyping (FDM 1650). Computer Applications in Engineering Education 7 (1999) 3, S. 186-195.

DÄUMLER 2003

Däumler, K.-D.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. 11. Aufl. Herne: Verlag Neue Wirtschafts-Briefe 2003. ISBN: 978-3-482-52301-4.

DECKARD 1986

Schutzrecht US 4,863,538 Patent (05.09.1989). The University of Texas System. Pr.: 920,580 1986-10-17. Deckard, C. R.: Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering.

DIETRICH 2005

Dietrich, E.: Eignungsnachweis von Messsystemen. 2., aktualisierte Aufl. München: Carl Hanser 2005. ISBN: 978-3-446-40169-3.

DIETRICH & SCHULZE 2005

Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 5., aktualisierte Aufl. München: Carl Hanser 2005. ISBN: 3-446-22894-2.

DIETRICH & SCHULZE 2007

Dietrich, E.; Schulze, A.: Eignungsnachweis von Prüfprozessen. 3., aktualisierte und erw. Aufl. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-40732-9.

DIETRICH ET AL. 2007

Dietrich, E.; Schulze, A.; Weber, S.: Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-41053-4.

DILLER ET AL. 2010

Diller, T. T.; Sreenivasan, R.; Beaman, J.; Bourell, D.; LaRocco, J.: Thermal Model of the Build Environment for Polyamide Powder Selective Laser Sintering. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 21st Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 09.-11. August 2010: The University of Texas at Austin 2010, S. 539-548.

DIN 4760 1982

DIN 4760: Gestaltabweichungen. Berlin: Beuth 1982.

DIN 2768-2 1991

DIN 2768-2: Allgemeintoleranzen. Berlin: Beuth 1991.

## 9 Literaturverzeichnis

---

DIN 2768-1 1991

DIN 2768-1: Allgemeintoleranzen. Berlin: Beuth 1991.

DIN 2000

DIN: The Economic Benefits of Standardization. Berlin: Beuth 2000.

DIN 8580 2003

DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DIN 10012 2004

DIN 10012: Messmanagementsysteme – Anforderungen an Messprozesse und Messmittel. Berlin: Beuth 2004.

DIN 55319-2 2007

DIN 55319-2: Statistische Verfahren – Teil 2: Qualitätsfähigkeitskenngrößen zur Beurteilung von Prozessen bei multivariat normalverteilten Merkmalswerten. Berlin: Beuth 2007.

DIN 1101 2008

DIN 1101: Geometrische Produktspezifikation (GPS). Berlin: Beuth 2008.

DIN 9100 2010

DIN 9100: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung. Berlin: Beuth 2010.

DIN 2011: ASTM International cooperating with ISO TC 261. Pressemitteilung.

New York, NY, USA: Beuth 2011.

DIN EN ISO 13485 2010

DIN EN ISO 13485: Medizinprodukte - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen für regulatorische Zwecke. Berlin: Beuth 2010.

DREHER 2005

Dreher, S.: Flexible Integration von Rapid Prototyping Prozessketten in die Produktentstehung. Diss. Technische Universität Berlin (2005). [ohne Verlagsnennung].

DUDEN 2011

Duden (Hrsg.): Deutsches Universalwörterbuch. Mannheim: Bibliographisches Institut 2011. ISBN: 978-3-411-05507-4.

EISEN 2009

Eisen, M. A.: Optimierte Parameterfindung und prozessorientiertes Qualitätsmanagement für das Selective-Laser-Melting-Verfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen. Zugl. Aachen: Shaker 2009. ISBN: 978-3-8322-8827-3.

EMMELMANN 2012

Emmelmann, C.: RM-Plattform Deutschland. <<http://www.tu-harburg.de/ilas/industrie/rm-plattform.html>> - 26.03.2012.

EOS 2008

EOS: Benutzerhandbuch FORMIGA P 100. Krailling bei München: [ohne Verlagsnennung] 2008.

---

EOS 2009

EOS: Benutzerhandbuch EOSINT M 270. Krailling bei München: [ohne Verlagsnennung] 2009.

EOS 2011

EOS: EOS Whitepaper: Part Property Management (PPM). Krailling bei München: [ohne Verlagsnennung] 2011.

EOS 2012

EOS: Werkstoffdatenbank. <<http://eos.materialdatacenter.com>> - 08.02.2012.

ESCHEY ET AL. 2011A

Eschey, C.; Feldmann, S.; Zaeh, M. F.: Rule-Based Free-Form Deformation for Additive Layer Manufacturing. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 08.-10. August 2011: The University of Texas at Austin 2011, S. 363–374.

ESCHEY ET AL. 2011B

Eschey, C.; Westhäuser, S.; Zäh, M. F.: Superposed Closed Control Loop For The Polymer Based Laser Sintering Technology. In: Spath, D. et al. (Hrsg.): Innovation in product and production. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2011. ISBN: 978-3-8396-0293-5.

FADEL & KIRSCHMAN 1996

Fadel, G. M.; Kirschman, C.: Accuracy issues in CAD to RP translations. Rapid Prototyping Journal 2 (1996) 2, S. 4–17.

FÖLLINGER 1994

Föllinger, O.: Regelungstechnik. 8., überarb. Aufl. Heidelberg: Hüthig 1994. ISBN: 3-7785-2336-8.

FORD & FORD 1993

Ford, N. J.; Ford, J. M.: Introducing formal methods. New York: Ellis Horwood 1993. ISBN: 0-13-484320-7.

GEBHARDT 2007

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. 3. Aufl. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-22666-1.

GERVASI 2007

Gervasi, V. R.: Statistical Process Control for Solid Freeform Fabrication Processes. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 18th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 06.-08. August 2007: The University of Texas at Austin 2007, S. 141–148.

GREVE & WENTURA 1997

Greve, W.; Wentura, D.: Wissenschaftliche Beobachtung. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union 1997. ISBN: 3-621-27360-3.

## 9 Literaturverzeichnis

---

### GROTH ET AL. 2010

Groth, C.; Bechmann, F.; Philippi, J.; Zäh, M. F.; Krol, T. A.; Branner, G.; Schwarze, D.: Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen (SimuSint) (Projektabschlussbericht des BMBF-Verbundprojekts 02PU2261). Augsburg: [ohne Verlagsnennung] 2010.

### GROTH 1992

Groth, U.: Kennzahlensystem zur Beurteilung und Analyse der Leistungsfähigkeit einer Fertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 978-3-181-46116-7.

### HAUSER ET AL. 2003

Hauser, C.; Childs, T. H. C.; Taylor, C. M.; Badrossamay, M.; Akhtar, S.; Wright, C. S.; Youseffi, M.; Xie, J.; Fox, P.; O'Neill, W.: Direct Selective Laser Sintering of Tool Steel Powders to High Density. Part A: Effects of Laser Beam Width and Scan Strategy. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 14th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 04.-06. August 2003: The University of Texas at Austin 2003, S. 644–655.

### HECHLER 2006

Hechler, J. K.: Formoptimierung unter Nebenbedingungen durch Freiform-Deformationen. Diss. Technische Universität Darmstadt (2006). [ohne Verlagsnennung].

### HOFFMANN 2002

Hoffmann, R.: Integration höherwertiger Feature-Elemente in den rechnergestützten Konstruktionsprozess. Diss. Universität Duisburg-Essen (2001). Zugl. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002. ISBN: 3-18-334420-3.

### HULL 1984

Schutzrecht US 4,575,330 Patent (11.03.1986). UVP Inc. Pr.: 638,905 1984-08-08. Hull, C. W.: Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography.

### IBRAHIM ET AL. 2009

Ibrahim, D.; Broilo, T. L.; Heitz, C.; de Oliveira, M. G.; de Oliveira, H. W.; Nobre, S. M. W.; dos Santos Filho, J. H. G.; Silva, D. N.: Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet™ models in the reproduction of mandibular anatomy. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 37 (2009) 3, S. 167–173.

### IWH 2011

Institut für Wirtschaftsforschung Halle: Auswirkungen der aus dem Konjunkturpaket II für das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) bereitgestellten Mittel auf die konjunkturelle Entwicklung. Halle (Saale): 2011. [ohne Verlagsnennung].

### ISO 2011

International Organization for Standardization: Economic benefits of standards. Genève: International Organization for Standardization 2011. ISBN: 978-92-67-10556-7.

---

ISHIKAWA 1990

Ishikawa, K.: Introduction to quality control. Tokyo: Chapman & Hall 1990. ISBN: 4-906224-61-X.

JACKÈL ET AL. 2006

Jackël, D.; Neunreither, S.; Wagner, F.: Methoden der Computeranimation. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-26114-8.

JACOBS 2000

Jacobs, P.: The effects of random noise shrinkage on rapid tooling accuracy. *Materials & Design* 21 (2000) 2, S. 127–136.

JURRENS 1999

Jurrens, K. K.: Standards for the rapid prototyping industry. *Rapid Prototyping Journal* 5 (1999) 4, S. 169–178.

KADDAR 2010

Kaddar, W.: Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). [ohne Verlagsnennung].

KAISER 2006

Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure. München: Carl Hanser 2006. ISBN: 3-446-22069-0.

KALMAN 1960

Kalman, R. E.: On the General Theory of Control Systems. In: Coales, J. F. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Congress of IFAC. Moscow, Russia, Dezember 1959: IFAC 1960, S. 481–492.

KARAPATIS 2002

Karapatis, P.: A Sub-Process Approach of Selective Laser Sintering. Diss. Université de Lausanne (2002). [ohne Verlagsnennung].

KELLER 1999

Keller, B.: Rapid prototyping. Diss. Universität Stuttgart (1998). Zugl. Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-8265-6554-1.

KEMPEN ET AL. 2011

Kempen, K.; Thijs, L.; Yasa, E.; Badrossamay, M.; Verheeecke, W.; Kruth, J.-P.: Process Optimization and Microstructural Analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 08.-10. August 2011: The University of Texas at Austin 2011, S. 484–495.

KLEIN 2006

Klein, B.: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. München: Oldenbourg 2006. ISBN: 978-3-486-57850-8.

KLEIN 2007

Klein, B.: Versuchsplanung – DoE. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-486-58352-6.

## 9 Literaturverzeichnis

---

### KLETTI & SCHUMACHER 2011

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion. Berlin: Springer 2011.  
ISBN: 978-3-642-13844-7.

### KLOCKE & PETERS 2003

Klocke, F.; Peters, S.: Potentiale generativer Verfahren für die Individualisierung von Produkten. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003, S. 3–12. ISBN: 3-540-00594-3.

### KOCZY 1998

Koczy, A.: Statistische Prozessregelung für die flexible Kleinserienfertigung. Diss. Universität Bochum (1998). Zugl. Aachen: Shaker 1998. ISBN: 3-8265-4368-8.

### KOLOSOV ET AL. 2004

Kolossov, S.; Boillat, E.; Glardon, R.; Fischer, P.; Locher, M.: 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process. International Journal of Machine Tools and Manufacture 44 (2004) 2–3, S. 117–123.

### KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2000

Kommission der europäischen Gemeinschaften: Memorandum über Lebenslanges Lernen. Brüssel: [ohne Verlagsnennung] 2000.

### KROL ET AL. 2009

Krol, T. A.; Branner, G.; Zäh, M. F.: Modelle zur thermomechanischen Simulation metallverarbeitender Strahlschmelzprozesse. In: CADFEM (Hrsg.): Proceedings of the ANSYS Conference & 27th CADFEM Users' Meeting 2009 (ACUM). Grafing, 18.-20. November 2009: CADFEM GmbH 2009. ISBN: 3-93752-306-5.

### KRUTH ET AL. 2008A

Kruth, J.-P.; Levy, G.; Schindel, R.; Craeghs, T.; Yasa, E.: Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering. In: Cardon, L. et al. (Hrsg.): 3rd International PMI Conference 2008, 17.-19. September 2008. S. 1–16.

### KRUTH ET AL. 2008B

Kruth, J.-P.; Mercelis, P.; Van Vaerenbergh, J.; Craeghs, T.: Feedback control of Selective Laser Melting. In: Bártolo, P. J. (Hrsg.): Virtual and rapid manufacturing. London: Taylor & Francis 2008, S. 521–527. ISBN: 978-0-415-41602-3.

### KÜSTERS ET AL. 2011

Küstern, Y.; Schäfer, M.; Witt, G.: Robuster Strahlschmelzprozess durch methodische Parameterfindung. RTjournal – Forum für Rapid Technologie 8 (2011) 1. S. 1–10.

### LAMOUSIN & WAGGENSPACK 1994

Lamousin, H. J.; Waggenspack, N. N.: NURBS-based free-form deformations. Computer Graphics and Applications, IEEE 14 (1994) 6, S. 59–65.

### LZN 2012

Laser Zentrum Nord: RM-Fachkraft. <<http://www.lzn-hamburg.de/ausweiterbildung/rm-fachkraft.html>> - 18.03.2012.



---

LEVY 2009

Levy, G. N.: Digital Layer Manufacturing Chances and Challenges. In: American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.): Proceedings of the 9th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. New York, 7.–9. Juli 2008: American Society of Mechanical Engineers 2009, S. 217–224. ISBN: 978-0-7918-4835-7.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY 2007

Loughborough University: ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint. Loughborough: [ohne Verlagsnennung] 2007.

LUTZMANN 2011

Lutzmann, S.: Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Diss. Technische Universität München (2010). Zugl. München: Utz 2011. ISBN: 978-3-8316-4070-6.

MA & BIN 2007

Ma, L.; Bin, H.: Temperature and stress analysis and simulation in fractal scanning-based laser sintering. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 34 (2007) 1, S. 898–903.

MAHESH ET AL. 2004

Mahesh, M.; Wong, Y. S.; Fuh, J. Y.; Loh, H. T.: Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes. Rapid Prototyping Journal 10 (2004) 2, S. 123–135.

MAJHI ET AL. 2000

Majhi, J.; Janardan, R.; Smid, M.; Schwerdt, J.: Multi-criteria geometric optimization problems in Layered Manufacturing. Computational Geometry – Theory and Applications 12 (2000) 1, S. 136-149.

MANETSBERGER ET AL. 2003

Manetsberger, K.; Shen, J.; Muellers, J.: Compensation of Non-Linear Shrinkage of Polymer Materials in Selective Laser Sintering. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 14th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 04.-06. August 2003: The University of Texas at Austin 2003, S. 346–356.

MATEK ET AL. 2011

Matek, W.; Muhs, D.; Roloff, H.: Maschinenelemente. 20., überarbeitete und erw. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2011. ISBN: 978-3-8348-1454-8.

MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Diss. RWTH Aachen (1999). Zugl. Aachen: Shaker 1999. ISBN: 978-3-8265-6571-7.

MEINERS ET AL. 2001

Schutzrecht DE 10104732C1 Patent (27.06.2002). Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. Pr.: 10104732.0-24 2001-02-02. Meiners, W.; Wissenbach, K.; Over, C.: Verfahren und Vorrichtung zum selektiven Laser-Schmelzen von metallischen Werkstoffen.

## 9 Literaturverzeichnis

---

MOESEN ET AL. 2011

Moesen, M.; Craeghs, T.; Kruth, J.-P.; Schrooten, J.: Robust beam compensation for laser-based additive manufacturing. *Computer-Aided Design* 43 (2011) 8, S. 876–888.

MOLCHO ET AL. 2009

Molcho, G.; Kowalski, P.; Schneor, R.; Denkena, B.; Zipori, Y.; Shpitalni, M.: Computer Aided Manufacturability Analysis Closing The CAD-CAM Knowledge Gap. In: American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.): Proceedings of the 9th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. New York, 7.–9. Juli 2009: American Society of Mechanical Engineers 2009. ISBN: 978-0-7918-4835-7.

MUMTAZ ET AL. 2011

Mumtaz, K.; Vora, P.; Hopkinson, N.: A Method to Eliminate Anchors/Supports from Directly Laser Melted Metal Powder Bed Processes. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 08.-10. August 2011: The University of Texas at Austin 2011, S. 55–64.

NIEBLING 2005

Niebling, F.: Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2005). Zugl. Bamberg: Meisenbach 2005. ISBN: 978-3-87525-219-4.

NIINO & SATO 2009

Niino, T.; Sato, K.: Effect of Powder Compaction in Plastic Laser Sintering Fabrication. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 20th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 03.-05. August 2009: The University of Texas at Austin 2009, S. 193–205.

NOBLE 1999

Noble, R. A.: Direct Manipulation of Surfaces using NURBS-Based Free-Form Deformations. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): Proceedings of the 1999 International Conference on Information Visualisation. Washington, DC, USA, 14.-16. Juli 1999: IEEE Computer Society 1999, S. 238-243. ISBN: 0-7695-0210-5.

NÖKEN 1997

Nöken, S.: Technologie des Selektiven Lasersinterns von Thermoplasten. Diss. RWTH Aachen (1997). Zugl. Aachen: Shaker 1997. ISBN: 978-3-8265-2483-7.

ONUH & HON 2001

Onuh, S. O.; Hon, K. K.: Improving Stereolithography Part Accuracy for Industrial Applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17 (2001) 1, S. 61–68.

OVER 2003

Over, C.: Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit Selective Laser Melting. Diss. RWTH Aachen (2003). Zugl. Aachen: Shaker 2003. ISBN: 978-3-8322-2245-1.

- 
- PACURAR ET AL. 2009  
Pacurar, R.; Balc, N.; Berce, P.; Farkas, A.: Software Compensations of the SLS Metal Parts Shrinkage. *Academic Journal of Manufacturing Engineering* 7 (2009) 1, S. 74–81.
- PACURAR ET AL. 2010  
Pacurar, R.; Balc, N.; Olimpia, R.: Improving the Accuracy of the SLS Metal Parts using the Finite Element Method. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* 2 (2010) 1, S. 61–66.
- PAHL 1990  
Pahl, G.: *Konstruieren mit 3D-CAD-Systemen*. Berlin: Springer 1990. ISBN: 3-540-52234-4.
- PAHL 2005  
Pahl, G.: *Konstruktionslehre*. 6. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-22048-8.
- PAPULA 2001  
Papula, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 10., erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2001. ISBN: 3-528-94236-3.
- PFEIFER 1993  
Pfeifer, T.: *Qualitätsmanagement*. München: Carl Hanser 1993. ISBN: 3-446-16526-6.
- PHILIPPI 2005  
Schutzrecht EP 1762122B1 Patent (26.03.2008). EOS GmbH Pr.: DE 102005024790 2005-05-26. Philippi, J.: Strahlungsheizung zum Heizen des Aufbaumaterials in einer Lasersintervorrichtung.
- RAGHUNATH & PANDEY 2007  
Raghunath, N.; Pandey, P. M.: Improving accuracy through shrinkage modeling by using Taguchi method in selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (2007) 6, S. 985–995.
- REHME 2010  
Rehme, O.: *Cellular design for laser freeform fabrication*. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg (2009). Zugl. Göttingen: Cuvillier 2010. ISBN: 978-3-86955-273-6.
- REHME & EMMELMANN 2005  
Rehme, O.; Emmelmann, C.: Reproducibility for properties of selective laser melting products. In: Beyer, E. (Hrsg.): *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*. Munich, 13.-16. Juni 2005: AT-Fachverlag 2005, S. 227–232. ISBN: 978-3-00-016402-6.
- REINHART ET AL. 2011  
Reinhart, G.; Glonegger, M.; Egbers, J.; Schilp, J.; Göritz, A.; Weikamp, J.: Taktzeitadaption unter Berücksichtigung der zirkadianen Rhythmik. *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011) 9, S. 595–599.

## 9 Literaturverzeichnis

---

REISCH 2007

Reisch, M.: Halbleiter-Bauelemente. 2., bearb. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-73199-3.

RIETZEL ET AL. 2011

Rietzel, D.; Drexler, M.; Kühlein, F.; Drummer, D.: Influence of temperature fields on the processing of polymer powders by means of laser and mask sintering technology. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 22nd Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 08.-10. August 2011: The University of Texas at Austin 2011, S. 252–262.

RINNE & MITTAG 1999

Rinne, H.; Mittag, H.-J.: Prozessfähigkeitsmessung für die industrielle Praxis. München: Carl Hanser 1999. ISBN: 3-446-21117-9.

SAUER 2005

Sauer, A.: Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten. Diss. Universität Duisburg-Essen (2005). Zugl. Aachen: Shaker 2005. ISBN: 3-83-224428-x.

SCHILLEN 2002

Schillen, V.: Erzeugung hochgenauer Schichtzerlegungen von 3D-Modellen für den Einsatz in Rapid-Prototyping-Anwendungen. Diss. Universität Stuttgart (2001). Zugl. Berlin: dissertation.de 2002. ISBN: 3-89825-420-8.

SCHLEIFENBAUM ET AL. 2011

Schleifenbaum, H.; Diatlov, A.; Hinke, C.; Bültmann, J.; Voswinckel, H.: Direct photonic production: towards high speed additive manufacturing of individualized goods. Production Engineering 5 (2011) 1, S. 359–371.

SCHLICK ET AL. 2010

Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 3. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-540-78332-9.

SCHUH ET AL. 2011

Schuh, G.; Aghassi, S.; Orilski, S.; Schubert, J.; Bambach, M.; Freudenberg, R.; Hinke, C.; Schiffer, M.: Technology roadmapping for the production in high-wage countries. Production Engineering 5 (2011) 1, S. 463–473.

SCHWARZE 2011

Schwarze, D.: Auswirkungen des Vorheizens beim Selective Laser Melting. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Seminar Additive Fertigung. München, 07.07.2011: Utz 2011. ISBN: 978-3-8316-4114-7.

SEDERBERG & PARRY 1986

Sederberg, T. W.; Parry, S. R.: Free-form deformation of solid geometric models. SIGGRAPH Comput. Graph 20 (1986) 1, S. 151-160.

SEHRT 2010

Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). Zugl. Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9229-4.

---

SENTHILKUMARAN ET AL. 2009

Senthilkumaran, K.; Pandey, P. M.; Rao, P. V.: New model for shrinkage compensation in selective laser sintering. *Virtual and Physical Prototyping* 4 (2009) 2, S. 49–62.

SENTHILKUMARAN ET AL. 2008

Senthilkumaran, K.; Pandey, P.; Rao, P.: Shrinkage compensation along single direction dixel space for improving accuracy in Selective Laser Sintering. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. Piscataway, N.J., USA, 23.-26.08.2008: IEEE 2008, S. 827–832. ISBN: 978-1-4244-2022-3.

SHELLABEAR 2011

Shellabear, M.: Ganzheitliches Qualitätsmanagement für die additive Fertigung am Beispiel EOSINT M. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): *Seminar Additive Fertigung*. München, 07.07.2011: Utz 2011, S. 1–18. ISBN: 978-3-8316-4114-7.

SHEN ET AL. 2000

Shen, J.; Steinberger, J.; Göpfert, J.; Gerner, R.; Daiber, F.; Manetsberger, K.; Ferstl, S.: Inhomogeneous Shrinkage of Polymer Materials in Selective Laser Sintering. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin (TX), USA, 08.-10. August 2000: The University of Texas at Austin 2000, S. 298–305.

SINGH & PRAKASH 2010

Singh, A. K.; Prakash, R. S.: DOE based three-dimensional finite element analysis for predicting density of a laser-sintered part. *Rapid Prototyping Journal* 16 (2010) 6, S. 460–467.

SIPPEL 2010

Sippel, D.: Design rules & detail resolution for SLS 3D printing.  
<[http://www.shapeways.com/tutorials/design\\_rules\\_for\\_3d\\_printing](http://www.shapeways.com/tutorials/design_rules_for_3d_printing)> - 05.02.2012.

SKRYNECKI 2010

Skrynecki, N.: Kundenorientierte Optimierung des generativen Strahlschmelzprozesses. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). Zugl. Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9217-1.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2011

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *Datenreport 2011 – Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung 2011. ISBN: 978-3-8389-7050-9.

STEINBERGER ET AL. 2000

Steinberger, J.; Shen, J.; Manetsberger, K.; Muellers, J.: The Simulation of the SLS Process as the Basis of a Process Optimization. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin (TX), USA, 08.-10. August 2000: The University of Texas at Austin 2000, S. 377–385.

## 9 Literaturverzeichnis

---

STOPP ET AL. 2008

Stopp, S.; Wolff, T.; Irlinger, F.; Lueth, T.: A new method for printer calibration and contour accuracy manufacturing with 3D-print technology. *Rapid Prototyping Journal* 14 (2008) 3, S. 167–172.

SYLVAC SA 2007

Sylvac SA: Bedienungsanleitung Hi\_Cal 300. Crissier, Schweiz: [ohne Verlagsnennung] 2007.

TANG ET AL. 2004

Tang, Y.; Loh, H. T.; Fuh, J.-Y.-H.; Wong, Y. S.; Lu, L.; Ning, Y.; Wang, X.: Accuracy Analysis and Improvement for Direct Laser Sintering. *Innovation in Manufacturing Systems and Technology* [ohne Jahrgang] (2004) 1, S. 1–8.

TASSI 2005

Tassi, E. J.: Knowledge-Features für die Produkt- und Technologieentwicklung in umformtechnischen Prozessketten. Diss. Technische Universität Chemnitz (2004). Zugl. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2005. ISBN: 3-937524-22-3.

THIE 1999

Thie, M.: Wissensbasierte Methode zur Qualitätsverbesserung in der Kleinserienproduktion. Diss. Technische Universität Berlin (1999). [ohne Verlagsnennung].

TONG ET AL. 2008

Tong, K.; Joshi, S.; Lehtihet, E. A.: Error compensation for fused deposition modeling (FDM) machine by correcting slice files. *Rapid Prototyping Journal* 14 (2008) 1, S. 4–14.

TONG ET AL. 2003

Tong, K.; Lehtihet, E. A.; Joshi, S.: Parametric error modeling and software error compensation for rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal* 9 (2003) 5, S. 301–313.

TONG ET AL. 2004

Tong, K.; Lehtihet, E. A.; Joshi, S.: Software compensation of rapid prototyping machines. *Precision Engineering* 28 (2004) 3, S. 280–292.

TÖPFER 2007

Töpfer, A.: *Six Sigma*. 4. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-48591-9.

TRENKE 2000

Trenke, D.: Konstruktionsregeln für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung von Werkzeugen und Prototypen. *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal* 25 (2000) 1, S. 85–90.

UMKEHRER 2000

Umkehrer, E.: Formalisierung von unsicherem Wissen. Diss. Technische Universität München (2000). Zugl. Berlin: AKA 2000. ISBN: 3-89838-240-0.

- 
- VDA 2008  
VDA: Auto Jahresbericht 2008. Frankfurt am Main: [ohne Verlagsnennung] 2008.
- VDI 2221 1993  
VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.
- VDI 21747 2007  
VDI 21747: Statistische Verfahren – Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen für kontinuierliche Qualitätsmerkmale. Berlin: Beuth 2007.
- VDI 3404 2009  
VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Berlin: Beuth 2009.
- VDI/VDE/DGQ 2618 2001  
VDI/VDE/DGQ 2618: Anweisungen zur Überwachung von Messmitteln für geometrische Größen. Berlin: Beuth 2001.
- VDMA 8669 1999  
VDMA 8669: Fähigkeitsuntersuchungen zur Abnahme spanender Werkzeugmaschinen. Berlin: Beuth 1999.
- WALTHER 1993  
Walther, C.: Systemtechnisches Verfahren zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionsstruktur technischer Systeme. Diss. Technische Universität München (1993). [ohne Verlagsnennung].
- WALTHER 2001  
Walther, C.: Systemtechnische Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionen großer Systeme. München: Utz 2001. ISBN: 3-89675-816-0.
- WANG 1999  
Wang, X.: Calibration of Shrinkage and Beam Offset in SLS Process. Rapid Prototyping Journal 5 (1999) 3, S. 129–133.
- WARNECKE ET. AL. 1996  
Warnecke, H.-J.; Bullinger, H.-J.; Hichert, R.; Voegelé, A.: Kostenrechnung für Ingenieure. 5. Aufl. München: Carl Hanser 1996. ISBN: 3-446-18695-6.
- WARTZACK ET AL. 2010  
Wartzack, S.; Drummer, D.; Wittmann, S.; Stuppy, J.; Rietzel, D.; Tremmel, S.; Kühlein, F.: Besonderheiten bei der Auslegung und Gestaltung lasergesinnter Bauteile. RTejournal – Forum für Rapid Technologie 7 (2010) 1, S. 1–12.
- WEGNER & WITT 2010  
Wegner, A.; Witt, G.: RM-gerechte Konstruktion funktionaler Bauteile. In: Hochschule Ostwestfalen-Lippe (Hrsg.): Tagungsband der 15. Fachtagung Rapid Prototyping. 19.11.2010

## 9 Literaturverzeichnis

---

WENDT 1956

Wendt, K.-G.: Möglichkeiten und Grenzen der Ermittlung von fertigungstechnischen Kennzahlen und Richtwerten. Köln: Westdeutscher Verlag 1956. (Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen 1231).

WEST & ROSEN 2001

West, A. P.; Rosen, D. W.: A process planning method for improving build performance in stereolithography. *Computer-Aided Design* 33 (2001) 1, S. 65–79.

WESTKÄMPER & WARNECKE 2010

Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik. 8., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-8348-0835-6.

WITT ET AL. 2010

Witt, G.; Weckend, F.; Köhler, P.: Abschlussbericht zum Forschungsthema Wissensbasiertes Unterstützungssystem für Rapid Prototyping gerechte 3D-CAD-CAM-Prozesse (AiF-Vorhaben-Nr. 15351 BG). Duisburg: [ohne Verlagsnennung] 2010.

WITT & WEGNER 2010

Witt, G.; Wegner, A.: Konstruktionsrichtlinien für den Einsatz von generativen Verfahren. *MM MaschinenMarkt* 14 (2010) 15.

WOHLERS 2010

Wohlers, T. T.: Wohlers report 2010. Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins, USA: Wohlers Associates 2010. ISBN: 0-97544-296-1.

YANG ET AL. 2002

Yang, H.-J.; Hwang, P.-J.; Lee, S.-H.: A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (2002) 1, S. 1203–1212.

ZAEH ET AL. 2010

Zaeh, M. F.; Krol, T. A.; Schilp, J.; Groth, C.: Analysis of industrially used ALM-parts by means of coupled field simulation. In: Cardon, L. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th International PMI Conference*. Ghent, Belgium, 15.-19. September 2010: University College Ghent 2010, S. 184–191.

ZÄH 2003

Zäh, M.: Megatrends in der Produktionstechnik – Herausforderungen für Gesellschaft, Wissenschaft und Ausbildung. In: Zäh, M. (Hrsg.): *Münchener Kolloquium Grenzen überwinden – Wachstum der neuen Art*. München, 27.-28. Februar 2003: Utz 2003, S. 269–297. ISBN: 3-8316-0222-0.

ZÄH 2006

Zäh, M.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien*. München: Carl Hanser 2006. ISBN: 978-3-44622-854-2.



---

ZÄH & BRANNER 2008

Zäh, M. F.; Branner, G.: Prozess-Struktur-Simulation im Bereich metallischer Schichtbauverfahren. In: CADFEM (Hrsg.): Tagungsband zur ANSYS Conference & 26. CADFEM Users' Meeting 2008 (ACUM). Darmstadt, 22.-23. Oktober 2008: CADFEM GmbH 2008. ISBN: 978-3-937523-06-4

ZHANG 2004

Zhang, D.: Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) für Aluminiumwerkstoffe. Diss. RWTH Aachen (2004). Zugl. Aachen: Shaker 2004. ISBN: 978-3-8322-3104-0.

ZHANG & CHOU 1996

Zhang, Y.; Chou, Y. K.: A Parametric Study of Part Distortions in FDM using 3D FEA. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 7th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX), USA, 12.-14. August 1996: The University of Texas at Austin 1996, S. 410–420.

ZHOU ET AL. 2000

Zhou, J. G.; Herscovici, D.; Chen, C. C.: Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts. International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2000) 3, S. 363–379.



# 10 Anhang

## 10.1 Probekörper zur Erfassung der Schwindung

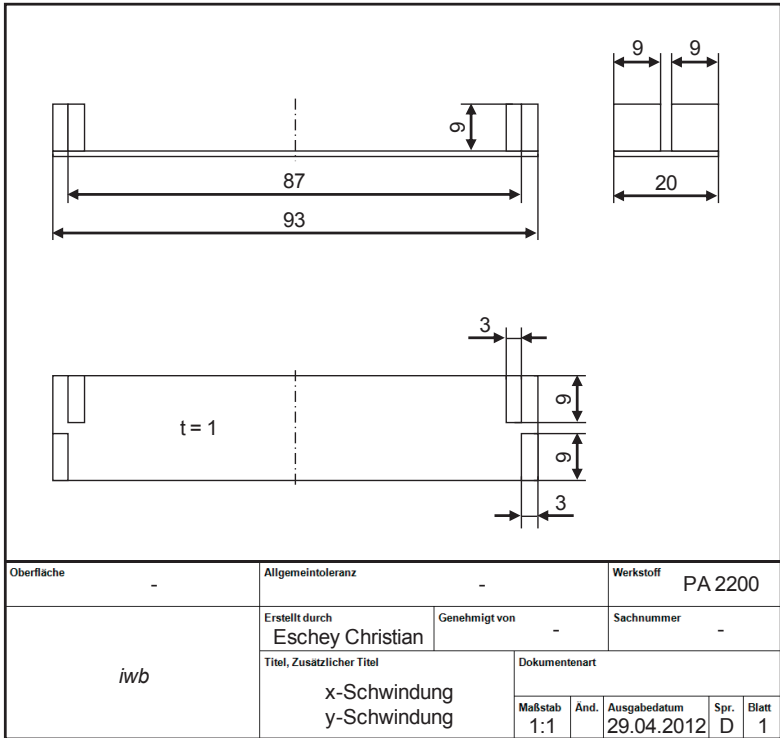


Abbildung 53: Probekörper zur Erfassung der x-Schwindung und der y-Schwindung

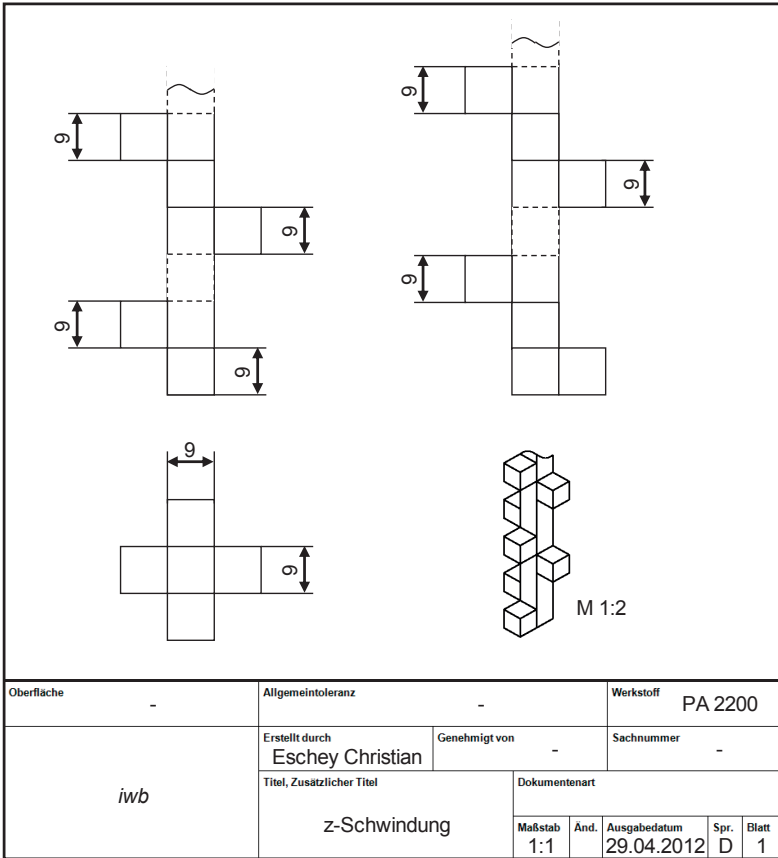


Abbildung 54: Probekörper zur Erfassung der z-Schwindung

## 10.2 Prüfmittelfähigkeit für Höhenmessgerät Hi\_Cal 300

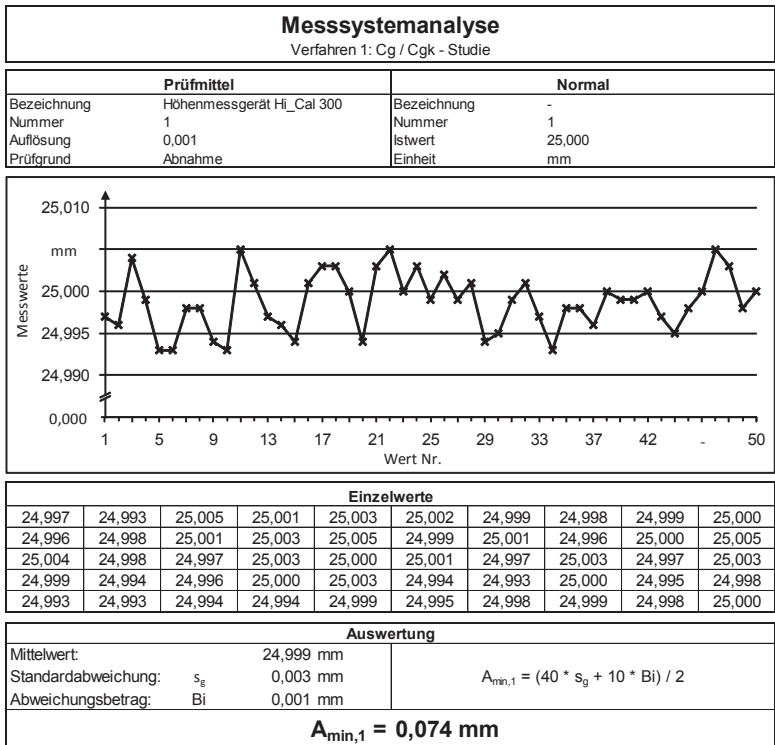


Abbildung 55: Ermittlung der Prüfmittelfähigkeit nach Verfahren 1

<b>Messsystemanalyse</b>						
Verfahren 2: ANOVA-Methode neue Messsysteme						
Prüfmittel			Werkstück			
Bezeichnung	Höhenmessgerät Hi_Cal 300		Bezeichnung	Werkstück (Lasersintern)		
Nummer	1		Nummer	-		
Auflösung	0,001		Istwert	-		
Prüfgrund	Abnahme		Einheit	mm		

Einzelwerte						
Teil	Prüfer A			Prüfer B		
	1	2	R	1	2	R
1	9,183	9,164	0,019	9,210	9,191	0,019
2	45,035	45,011	0,024	45,050	45,035	0,015
3	81,036	81,011	0,025	81,080	81,046	0,034
4	116,923	116,917	0,006	116,962	116,950	0,012
5	152,819	152,798	0,021	152,897	152,858	0,039
6	188,808	188,796	0,012	188,814	188,792	0,022
7	224,716	224,723	0,007	224,794	224,759	0,035
8	260,635	260,671	0,036	260,730	260,687	0,043
9	9,182	9,165	0,017	9,188	9,188	0,000
10	45,028	45,039	0,011	45,041	45,023	0,018

Auswertung			
Wiederholbarkeit	EV =	0,095 mm	$A_{\min,2} = (5 * R\&R) / 2$
Nachvollziehbarkeit	AV =	0,145 mm	
Messsystem	R&R =	0,173 mm	
<b><math>A_{\min,2} = 0,433 \text{ mm}</math></b>			

Abbildung 56: Ermittlung der Prüfmittelfähigkeit nach Verfahren 2

### 10.3 Messdaten und Auswertungen zur Schwindung in x-Richtung

Tabelle 14: Messdaten der Probekörper zur Erfassung der x-Schwindung  
(Teil 1 von 3) (alle Werte in mm)

Position des Probekörpers			Innenlänge	Außenlänge	Gemittelte Länge
X	Y	Z			
56	25	10	87,039	87,127	87,083
56	50	10	86,924	87,046	86,985
56	75	10	86,858	86,965	86,911
56	100	10	87,164	87,080	87,122
56	125	10	87,017	86,892	86,955
56	150	10	87,075	86,814	86,944
56	175	10	86,852	86,993	86,923
56	200	10	86,870	86,995	86,932
56	225	10	87,011	87,137	87,074
143	25	10	86,885	87,085	86,985
143	50	10	87,121	87,099	87,110
143	75	10	87,105	86,990	87,048
143	100	10	86,920	87,094	87,007
143	125	10	87,096	87,152	87,124
143	150	10	86,926	86,959	86,943
143	175	10	86,992	87,096	87,044
143	200	10	87,066	86,968	87,017
143	225	10	86,963	86,977	86,970
56	25	80	86,904	87,151	87,028
56	50	80	86,971	86,826	86,899
56	75	80	86,889	86,967	86,928
56	100	80	86,938	87,042	86,990
56	125	80	86,975	86,855	86,915
56	150	80	86,817	87,182	87,000

## 10 Anhang

---

Fortsetzung Tabelle 14 (Teil 2 von 3) (alle Werte in mm)

Position des Probekörpers			Innenlänge	Außenlänge	Gemittelte Länge
X	Y	Z			
56	175	80	86,888	86,972	86,930
56	200	80	87,111	86,831	86,971
56	225	80	87,060	86,901	86,981
143	25	80	87,064	87,031	87,048
143	50	80	87,067	86,903	86,985
143	75	80	86,947	86,966	86,957
143	100	80	87,089	86,988	87,038
143	125	80	87,017	87,085	87,051
143	150	80	87,000	86,918	86,959
143	175	80	86,865	86,907	86,886
143	200	80	87,025	86,906	86,966
143	225	80	86,869	87,128	86,999
56	25	150	87,146	86,970	87,058
56	50	150	87,129	86,977	87,053
56	75	150	87,031	86,998	87,014
56	100	150	86,915	86,904	86,909
56	125	150	87,085	87,008	87,047
56	150	150	86,972	87,120	87,046
56	175	150	86,991	87,062	87,027
56	200	150	86,909	87,060	86,984
56	225	150	86,973	86,984	86,979
143	25	150	86,880	86,866	86,873
143	50	150	86,811	86,928	86,869
143	75	150	86,997	86,942	86,969



Fortsetzung Tabelle 14 (Teil 3 von 3) (alle Werte in mm)

Position des Probekörpers			Innen- länge	Außen- länge	Gemittelte Länge
X	Y	Z			
143	100	150	86,989	87,074	87,032
143	125	150	86,877	86,851	86,864
143	150	150	86,973	86,861	86,917
143	175	150	87,030	87,079	87,055
143	200	150	86,984	87,041	87,012
143	225	150	87,011	87,064	87,038
56	25	220	87,084	86,916	87,000
56	50	220	86,934	87,163	87,048
56	75	220	86,912	86,958	86,935
56	100	220	87,174	86,890	87,032
56	125	220	86,890	86,987	86,938
56	150	220	87,028	86,953	86,991
56	175	220	86,981	87,018	86,999
56	200	220	86,990	87,100	87,045
56	225	220	87,074	87,018	87,046
143	25	220	86,816	87,005	86,910
143	50	220	87,025	86,957	86,991
143	75	220	86,937	87,003	86,970
143	100	220	86,860	87,014	86,937
143	125	220	86,879	87,002	86,940
143	150	220	87,078	86,964	87,021
143	175	220	86,998	87,122	87,060
143	200	220	86,996	86,873	86,934
143	225	220	86,855	86,969	86,912

## 10.4 Messdaten und Auswertungen zur Schwindung in y-Richtung

Tabelle 15: Messdaten der Probekörper zur Erfassung der y-Schwindung  
(Teil 1 von 2) (alle Werte in mm)

Position des Probekörpers			Innenlänge	Außenlänge	Gemittelte Länge
X	Y	Z			
25	56	10	87,143	87,066	87,105
25	194	10	87,144	87,003	87,074
50	125	10	86,902	87,178	87,040
75	56	10	86,987	87,084	87,036
75	194	10	87,303	86,967	87,135
100	125	10	87,121	87,008	87,065
125	56	10	87,109	87,027	87,068
125	194	10	86,945	87,326	87,136
150	125	10	87,052	87,157	87,105
175	56	10	87,138	86,996	87,067
175	194	10	86,996	87,084	87,040
25	56	80	87,082	87,076	87,079
25	194	80	87,001	87,098	87,049
50	125	80	86,970	87,032	87,001
75	56	80	86,936	87,179	87,057
75	194	80	87,277	86,871	87,074
100	125	80	86,995	87,128	87,062
125	56	80	87,173	86,869	87,021
125	194	80	87,035	87,141	87,088
150	125	80	87,190	86,894	87,042
175	56	80	87,041	87,056	87,049
175	194	80	87,098	87,000	87,049

Fortsetzung Tabelle 15 (Teil 2 von 2) (alle Werte in mm)

Position des Probekörpers			Innen- länge	Außen- länge	Gemittelte Länge
X	Y	Z			
25	56	150	87,017	87,200	87,108
25	194	150	87,014	87,040	87,027
50	125	150	87,044	86,976	87,010
75	56	150	86,913	87,178	87,045
75	194	150	87,040	87,153	87,097
100	125	150	87,055	87,066	87,060
125	56	150	86,958	87,124	87,041
125	194	150	87,207	86,927	87,067
150	125	150	87,150	87,001	87,075
175	56	150	87,014	87,057	87,036
175	194	150	87,236	86,799	87,017
25	56	220	86,893	87,270	87,082
25	194	220	87,026	87,050	87,038
50	125	220	86,971	87,059	87,015
75	56	220	86,945	87,098	87,021
75	194	220	87,317	86,918	87,118
100	125	220	87,239	86,935	87,087
125	56	220	87,107	86,953	87,030
125	194	220	87,257	87,023	87,140
150	125	220	87,002	87,146	87,074
175	56	220	87,079	87,070	87,075
175	194	220	86,872	87,199	87,036

### 10.5 Messdaten und Auswertungen zur Schwindung in z-Richtung

Die nachfolgenden Tabellen enthalten die Messdaten und Auswertungen zur Schwindung in z-Richtung des untersuchten Systems. Aufgrund der Vielzahl an Daten wurden diese nach folgender Struktur untergliedert.

- Messdaten der Probekörper zur Erfassung der z-Schwindung
  - MF(0) bis MF(10): Tabelle 16 (Teil 1 von 3)
  - MF(11) bis MF(21): Tabelle 16 (Teil 2 von 3)
  - MF(22) bis MF(31): Tabelle 16 (Teil 3 von 3)
  - Skalierungsfaktoren der positionsabhängigen z-Schwindung: Tabelle 17
- Messdaten der vordeformierten Probekörper zur Erfassung der z-Schwindung
  - MF(0) bis MF(10): Tabelle 18 (Teil 1 von 3)
  - MF(11) bis MF(21): Tabelle 18 (Teil 2 von 3)
  - MF(22) bis MF(31): Tabelle 18 (Teil 3 von 3)
  - Skalierungsfaktoren der vordeformierten positionsabhängigen z-Schwindung: Tabelle 19

Tabelle 16: Messdaten der Probekörper zur Erfassung der z-Schwindung  
(Teil 1 von 3) (alle Werte in mm)

Position		Messfläche										
X	Y	MF(0)	MF(1)	MF(2)	MF(3)	MF(4)	MF(5)	MF(6)	MF(7)	MF(8)	MF(9)	MF(10)
16	16	9,064	18,106	27,058	36,044	45,085	54,121	63,098	72,096	81,141	90,201	99,164
44	16	9,038	18,071	27,046	35,996	44,914	54,066	63,086	72,045	81,013	90,071	99,096
72	16	9,021	18,061	26,973	35,964	44,872	54,056	62,941	71,983	80,950	90,018	98,944
100	16	8,999	18,016	27,001	35,951	44,883	54,002	63,014	71,954	80,941	89,981	98,984
128	16	8,939	17,939	27,025	35,969	44,810	53,926	63,021	72,003	80,862	89,932	99,020
156	16	8,977	17,999	26,975	35,965	44,834	53,968	62,968	72,027	80,897	89,934	98,961
184	16	9,023	18,036	26,990	35,988	44,927	54,033	62,996	72,060	81,064	90,065	99,031
16	44	9,057	18,096	27,075	35,985	45,009	54,070	63,087	72,026	81,030	90,090	99,118
44	44	9,032	18,085	27,018	35,963	44,993	54,031	62,999	71,917	80,953	90,006	98,977
72	44	9,002	18,011	26,967	35,919	44,929	53,956	62,911	71,917	80,857	89,887	98,888
100	44	8,981	17,986	26,960	35,936	44,922	53,931	62,960	71,927	80,863	89,864	98,870
128	44	8,944	17,896	26,879	35,872	44,866	53,861	62,832	71,832	80,789	89,777	98,749
156	44	8,985	17,946	26,972	35,927	44,920	53,920	62,958	71,939	80,872	89,858	98,911
184	44	8,971	17,918	26,934	35,996	44,972	53,935	62,960	72,038	80,968	89,944	98,968
16	71	9,031	18,119	27,023	35,969	44,992	54,121	63,034	71,915	80,860	89,967	98,915
44	71	8,978	18,042	27,001	35,939	44,894	53,990	62,959	71,815	80,693	89,792	98,798
72	71	8,999	18,005	26,966	35,927	44,916	53,951	62,913	71,786	80,707	89,740	98,737
100	71	8,931	17,927	26,932	35,913	44,844	53,853	62,864	71,751	80,655	89,648	98,673
128	71	8,965	17,968	26,963	35,925	44,905	53,904	62,901	71,790	80,723	89,702	98,736
156	71	8,949	17,952	26,951	35,914	44,897	53,885	62,909	71,770	80,706	89,680	98,756
184	71	8,923	17,914	26,992	35,964	44,906	53,935	62,995	71,901	80,769	89,778	98,893
16	98	9,030	18,061	27,030	35,960	44,990	54,048	63,011	71,958	80,943	89,988	98,989
44	98	9,010	18,019	26,974	35,912	44,911	53,957	62,902	71,871	80,819	89,847	98,826
72	98	8,980	17,999	26,981	35,903	44,891	53,908	62,888	71,845	80,825	89,818	98,815
100	98	8,986	18,007	27,002	35,943	44,906	53,928	62,927	71,870	80,794	89,826	98,821
128	98	8,939	17,986	27,002	35,910	44,857	53,934	62,958	71,882	80,746	89,797	98,865
156	98	8,945	17,953	26,967	35,923	44,882	53,889	62,906	71,905	80,817	89,794	98,822
184	98	8,942	17,967	27,028	35,983	44,904	53,955	63,044	72,010	80,877	89,923	99,019
16	125	8,904	18,044	27,011	35,934	44,973	53,981	62,974	71,935	80,844	89,964	98,979
44	125	8,869	18,062	27,006	35,914	44,878	53,984	62,939	71,871	80,653	89,897	98,842
72	125	8,885	17,995	26,976	35,926	44,796	53,883	62,859	71,851	80,712	89,764	98,782
100	125	8,884	17,980	26,983	35,892	44,870	53,878	62,877	71,833	80,691	89,759	98,773
128	125	8,857	18,004	26,977	35,878	44,855	53,934	62,921	71,858	80,648	89,809	98,784
156	125	8,836	17,967	26,946	35,928	44,865	53,920	62,916	71,889	80,649	89,798	98,805
184	125	8,881	17,982	27,010	35,984	44,963	53,948	62,994	71,993	80,850	89,932	98,977
16	152	8,982	18,009	27,027	36,014	45,003	54,065	62,976	71,958	80,982	90,002	99,050
44	152	8,965	18,002	26,986	36,014	44,957	54,037	62,894	71,939	80,849	89,913	98,908
72	152	8,981	17,975	26,974	36,002	44,944	53,970	62,913	71,883	80,821	89,848	98,865
100	152	8,961	17,974	26,957	35,979	44,948	53,979	62,879	71,917	80,860	89,879	98,853
128	152	8,929	17,916	26,988	36,002	44,942	53,954	62,936	71,944	80,824	89,812	98,933
156	152	8,967	17,974	26,960	36,023	44,989	54,030	62,926	71,906	80,894	89,929	98,927
184	152	8,937	17,948	26,977	36,031	45,000	54,007	62,949	72,034	80,998	89,982	99,013
16	179	8,965	17,972	26,975	35,927	44,883	53,930	63,066	71,990	80,913	89,954	99,021
44	179	8,963	18,003	26,945	35,864	44,855	53,930	62,971	71,896	80,819	89,895	98,863
72	179	8,950	17,970	26,981	35,891	44,830	53,874	63,007	71,917	80,798	89,834	98,884
100	179	8,936	17,936	26,976	35,892	44,816	53,832	63,017	71,913	80,760	89,789	98,880
128	179	8,918	17,915	26,954	35,880	44,819	53,859	63,009	71,924	80,780	89,804	98,857
156	179	8,940	17,910	26,989	35,920	44,860	53,836	63,055	71,982	80,833	89,822	98,953
184	179	8,940	17,908	27,001	35,944	44,892	53,878	63,097	72,046	80,924	89,929	99,028
16	206	8,827	17,986	27,026	35,872	44,854	53,945	62,988	71,808	80,779	89,844	98,915
44	206	8,852	17,990	27,038	35,894	44,812	53,967	62,940	71,808	80,680	89,756	98,814
72	206	8,874	17,933	26,941	35,908	44,844	53,867	62,884	71,804	80,701	89,731	98,751
100	206	8,822	17,887	26,972	35,904	44,805	53,814	62,894	71,837	80,683	89,670	98,782
128	206	8,824	17,919	26,958	35,896	44,827	53,847	62,921	71,820	80,686	89,720	98,795
156	206	8,820	17,942	26,990	35,908	44,837	53,866	62,940	71,839	80,693	89,753	98,824
184	206	8,839	17,949	26,976	35,980	44,881	53,930	63,037	71,992	80,811	89,843	98,932
16	233	8,960	17,998	26,984	35,893	44,876	53,945	62,925	71,842	80,822	89,900	98,880
44	233	8,944	18,064	26,981	35,917	44,854	54,006	62,909	71,878	80,727	89,900	98,828
72	233	8,918	18,010	26,975	35,888	44,828	53,953	62,925	71,838	80,693	89,824	98,814
100	233	8,918	17,961	26,986	35,879	44,805	53,889	62,927	71,805	80,672	89,795	98,826
128	233	8,918	17,975	26,986	35,901	44,821	53,924	62,949	71,841	80,710	89,800	98,843
156	233	8,887	17,882	26,979	35,902	44,797	53,825	62,948	71,887	80,698	89,744	98,879
184	233	8,942	17,957	27,018	35,959	44,921	53,940	62,982	71,947	80,874	89,905	98,942
<b>Sollwerte</b>		<b>9,000</b>	<b>18,000</b>	<b>27,000</b>	<b>36,000</b>	<b>45,000</b>	<b>54,000</b>	<b>63,000</b>	<b>72,000</b>	<b>81,000</b>	<b>90,000</b>	<b>99,000</b>

Fortsetzung Tabelle 16 (Teil 2 von 3) (alle Werte in mm)

Messfläche										
MF(11)	MF(12)	MF(13)	MF(14)	MF(15)	MF(16)	MF(17)	MF(18)	MF(19)	MF(20)	MF(21)
108,147	117,191	126,234	135,226	144,208	153,259	162,303	171,286	180,253	189,316	198,371
108,053	117,058	126,129	135,138	144,101	153,105	162,153	171,185	180,135	189,131	198,173
107,961	116,958	126,048	134,976	143,990	152,985	162,052	170,987	179,968	188,982	198,057
107,983	116,962	126,003	135,009	143,999	152,983	162,021	171,009	179,984	188,912	198,028
107,970	116,896	125,945	135,061	143,995	152,922	161,942	171,034	180,041	188,932	197,975
108,000	116,931	125,985	135,001	144,036	152,950	161,977	171,026	180,032	188,987	198,013
108,057	117,086	126,110	135,092	144,109	153,122	162,155	171,128	180,160	189,140	198,185
108,024	117,072	126,130	135,128	144,034	153,066	162,129	171,138	180,062	189,077	198,148
107,940	116,964	126,003	134,965	143,923	152,937	161,988	170,980	179,896	188,942	197,970
107,850	116,813	125,869	134,859	143,830	152,804	161,844	170,822	179,783	188,763	197,804
107,851	116,813	125,834	134,837	143,829	152,773	161,796	170,813	179,828	188,731	197,769
107,748	116,749	125,771	134,707	143,713	152,725	161,695	170,670	179,674	188,669	197,646
107,907	116,882	125,839	134,900	143,888	152,849	161,836	170,886	179,863	188,831	197,792
108,032	116,998	125,964	134,998	144,067	153,031	161,979	171,004	180,065	189,033	197,994
107,893	116,884	126,089	135,026	143,998	152,883	162,095	171,037	180,005	188,971	198,089
107,741	116,685	125,876	134,860	143,801	152,620	161,848	170,855	179,778	188,687	197,797
107,694	116,660	125,816	134,789	143,754	152,599	161,748	170,718	179,695	188,639	197,688
107,678	116,591	125,699	134,701	143,713	152,515	161,622	170,654	179,646	188,545	197,553
107,678	116,652	125,754	134,770	143,724	152,600	161,700	170,706	179,691	188,649	197,631
107,739	116,671	125,770	134,814	143,773	152,626	161,747	170,772	179,726	188,686	197,687
107,885	116,773	125,899	134,970	143,969	152,757	161,895	170,986	180,000	188,880	197,889
107,946	116,935	125,989	134,967	143,908	152,910	161,978	170,959	179,895	188,892	197,944
107,793	116,766	125,798	134,769	143,733	152,704	161,735	170,697	179,653	188,636	197,670
107,731	116,719	125,711	134,729	143,666	152,645	161,649	170,646	179,575	188,567	197,587
107,745	116,696	125,747	134,743	143,689	152,606	161,664	170,671	179,606	188,530	197,574
107,781	116,670	125,713	134,779	143,711	152,572	161,654	170,684	179,627	188,507	197,562
107,813	116,742	125,735	134,777	143,756	152,678	161,683	170,725	179,710	188,642	197,614
107,970	116,855	125,917	135,009	143,965	152,841	161,883	170,999	179,943	188,849	197,882
107,880	116,903	125,921	134,942	143,847	152,865	161,900	170,905	179,826	188,839	197,791
107,741	116,672	125,802	134,761	143,687	152,584	161,733	170,697	179,626	188,523	197,556
107,762	116,617	125,669	134,678	143,611	152,496	161,558	170,592	179,536	188,402	197,369
107,693	116,671	125,637	134,669	143,601	152,557	161,539	170,584	179,516	188,444	197,364
107,718	116,649	125,733	134,714	143,629	152,560	161,648	170,627	179,551	188,505	197,428
107,778	116,685	125,730	134,724	143,700	152,594	161,650	170,685	179,649	188,546	197,483
107,935	116,913	125,887	134,963	143,908	152,880	161,882	170,937	179,893	188,849	197,758
107,925	116,906	125,974	135,006	143,885	152,855	161,925	170,966	179,844	188,826	197,896
107,839	116,762	125,854	134,815	143,749	152,696	161,785	170,760	179,702	188,628	197,716
107,799	116,724	125,736	134,755	143,688	152,605	161,649	170,671	179,609	188,525	197,555
107,779	116,762	125,759	134,744	143,676	152,658	161,676	170,654	179,600	188,556	197,596
107,793	116,721	125,739	134,826	143,747	152,626	161,639	170,731	179,634	188,537	197,556
107,831	116,811	125,874	134,865	143,759	152,730	161,809	170,822	179,681	188,690	197,733
107,973	116,969	125,930	134,973	143,959	152,933	161,923	170,963	179,942	188,891	197,910
107,928	116,856	125,915	134,965	143,878	152,816	161,884	170,934	179,849	188,783	197,843
107,775	116,725	125,791	134,778	143,686	152,620	161,714	170,709	179,618	188,561	197,635
107,784	116,705	125,759	134,793	143,699	152,614	161,670	170,719	179,618	188,529	197,579
107,776	116,677	125,679	134,785	143,683	152,546	161,594	170,685	179,603	188,459	197,482
107,799	116,686	125,728	134,787	143,707	152,597	161,635	170,709	179,644	188,513	197,549
107,879	116,755	125,745	134,883	143,805	152,701	161,691	170,822	179,763	188,632	197,619
108,005	116,914	125,905	135,026	143,993	152,889	161,881	171,000	179,947	188,863	197,873
107,746	116,703	125,812	134,849	143,598	152,524	161,645	170,724	179,558	188,476	197,685
107,689	116,588	125,680	134,741	143,506	152,411	161,514	170,584	179,445	188,318	197,525
107,659	116,597	125,650	134,677	143,502	152,419	161,476	170,505	179,437	188,347	197,484
107,708	116,577	125,575	134,717	143,547	152,418	161,398	170,531	179,464	188,321	197,428
107,721	116,608	125,650	134,737	143,581	152,442	161,473	170,558	179,495	188,384	197,496
107,760	116,623	125,696	134,795	143,584	152,460	161,511	170,626	179,550	188,401	197,535
107,913	116,769	125,838	134,916	143,820	152,658	161,703	170,791	179,806	188,644	197,788
107,762	116,646	125,717	134,744	143,629	152,607	161,696	170,691	179,585	188,542	197,765
107,760	116,563	125,744	134,699	143,647	152,530	161,714	170,654	179,590	188,463	197,745
107,728	116,522	125,645	134,695	143,585	152,475	161,594	170,610	179,517	188,412	197,628
107,741	116,487	125,604	134,688	143,615	152,469	161,560	170,618	179,530	188,403	197,585
107,763	116,547	125,645	134,699	143,622	152,509	161,596	170,640	179,563	188,449	197,629
107,820	116,562	125,597	134,737	143,657	152,520	161,569	170,692	179,628	188,467	197,618
107,899	116,735	125,748	134,857	143,790	152,698	161,754	170,824	179,803	188,698	197,863
108,000	117,000	126,000	135,000	144,000	153,000	162,000	171,000	180,000	189,000	198,000

Fortsetzung Tabelle 16 (Teil 3 von 3) (alle Werte in mm)

MF(22)	MF(23)	MF(24)	MF(25)	Messfläche					MF(30)	MF(31)
				MF(26)	MF(27)	MF(28)	MF(29)	MF(30)		
207.318	216.277	225.350	234.384	243.373	252.408	261.394	270.413	279.432	288.429	
207.176	216.151	225.169	234.170	243.237	252.228	261.202	270.201	279.223	288.196	
206.950	215.968	224.987	234.022	242.969	251.939	260.987	269.969	278.983	288.004	
207.014	215.998	225.014	233.999	243.022	252.032	261.089	269.963	278.984	287.967	
207.054	216.030	224.938	233.935	242.916	252.053	261.100	270.020	279.048	288.024	
207.001	216.031	224.986	233.980	243.024	252.077	261.064	269.952	279.067	287.994	
207.175	216.166	225.192	234.186	243.291	252.139	261.181	270.256	279.241	288.192	
207.129	216.060	225.085	234.118	243.160	252.120	261.126	270.072	279.100	288.148	
206.947	215.899	224.948	233.950	242.931	251.902	260.921	269.884	278.826	287.882	
206.759	215.775	224.753	233.769	242.702	251.762	260.681	269.692	278.650	287.659	
206.753	215.762	224.726	233.703	242.675	251.684	260.619	269.598	278.628	287.658	
206.617	215.609	224.649	233.573	242.594	251.526	260.558	269.492	278.533	287.434	
206.830	215.839	224.800	233.732	242.751	251.801	260.792	269.782	278.726	287.719	
206.998	216.063	225.063	233.997	243.064	252.027	261.107	270.045	279.103	288.110	
207.014	216.000	225.023	234.088	243.021	252.005	261.006	270.018	279.035	288.052	
206.766	215.729	224.657	233.739	242.654	251.643	260.691	269.648	278.714	287.605	
206.640	215.627	224.632	233.596	242.584	251.555	260.553	269.495	278.538	287.495	
206.562	215.599	224.507	233.476	242.421	251.519	260.458	269.362	278.482	287.406	
206.629	215.608	224.602	233.554	242.518	251.511	260.554	269.444	278.446	287.473	
206.701	215.708	224.664	233.623	242.612	251.625	260.664	269.533	278.604	287.489	
206.975	215.993	224.878	233.875	242.897	251.910	260.934	269.934	278.903	287.877	
206.933	215.883	224.904	233.933	242.950	251.807	260.845	269.807	278.916	287.836	
206.612	215.596	224.614	233.587	242.489	251.605	260.446	269.603	278.532	287.543	
206.571	215.501	224.489	233.470	242.468	251.413	260.415	269.407	278.423	287.394	
206.563	215.535	224.481	233.458	242.362	251.391	260.455	269.414	278.311	287.298	
206.591	215.546	224.443	233.477	242.443	251.433	260.418	269.389	278.355	287.308	
206.626	215.648	224.599	233.551	242.535	251.552	260.511	269.508	278.490	287.424	
206.954	215.925	224.846	233.858	242.908	251.862	260.867	269.854	278.931	287.847	
206.792	215.705	224.818	233.856	242.804	251.774	260.829	269.749	278.768	287.693	
206.511	215.447	224.489	233.594	242.418	251.436	260.359	269.466	278.293	287.330	
206.373	215.344	224.199	233.353	242.257	251.276	260.165	269.197	278.181	287.121	
206.386	215.309	224.370	233.345	242.272	251.245	260.279	269.170	278.099	287.212	
206.446	215.382	224.433	233.467	242.407	251.325	260.327	269.308	278.233	287.226	
206.476	215.468	224.495	233.518	242.502	251.375	260.429	269.425	278.362	287.326	
206.827	215.777	224.845	233.841	242.825	251.729	260.772	269.723	278.775	287.749	
206.916	215.812	224.815	233.865	242.804	251.850	260.818	269.799	278.788	287.817	
206.676	215.641	224.590	233.647	242.617	251.616	260.623	269.544	278.545	287.528	
206.571	215.549	224.473	233.445	242.418	251.333	260.400	269.443	278.414	287.303	
206.564	215.492	224.474	233.479	242.510	251.396	260.411	269.389	278.300	287.301	
206.629	215.553	224.475	233.488	242.486	251.548	260.414	269.465	278.429	287.416	
206.718	215.613	224.656	233.703	242.634	251.560	260.648	269.597	278.649	287.654	
206.946	215.920	224.881	233.901	242.891	251.828	260.912	269.917	278.921	287.868	
206.871	215.828	224.791	233.829	242.785	251.748	260.882	269.825	278.699	287.811	
206.600	215.539	224.532	233.553	242.502	251.475	260.423	269.440	278.428	287.360	
206.599	215.541	224.478	233.502	242.448	251.494	260.413	269.406	278.475	287.484	
206.570	215.506	224.410	233.383	242.397	251.386	260.359	269.314	278.395	287.286	
206.608	215.543	224.458	233.480	242.498	251.508	260.390	269.347	278.323	287.399	
206.733	215.701	224.616	233.562	242.570	251.639	260.568	269.590	278.569	287.505	
206.957	215.941	224.872	233.835	242.985	251.945	260.864	269.914	278.886	287.913	
206.759	215.597	224.553	233.656	242.525	251.569	260.511	269.470	278.476	287.510	
206.562	215.457	224.382	233.434	242.337	251.367	260.270	269.232	278.264	287.237	
206.504	215.461	224.402	233.419	242.306	251.263	260.351	269.270	278.259	287.187	
206.525	215.479	224.364	233.345	242.324	251.257	260.236	269.243	278.214	287.187	
206.571	215.559	224.457	233.445	242.357	251.423	260.385	269.291	278.322	287.219	
206.619	215.563	224.480	233.500	242.432	251.444	260.421	269.393	278.338	287.315	
206.848	215.875	224.750	233.788	242.767	251.738	260.635	269.727	278.706	287.648	
206.764	215.648	224.608	233.732	242.567	251.563	260.628	269.555	278.501	287.534	
206.672	215.650	224.550	233.695	242.493	251.552	260.483	269.427	278.431	287.444	
206.654	215.552	224.477	233.579	242.448	251.369	260.383	269.472	278.365	287.423	
206.636	215.580	224.468	233.533	242.430	251.403	260.442	269.358	278.326	287.331	
206.666	215.595	224.520	233.579	242.436	251.416	260.484	269.403	278.438	287.387	
206.725	215.681	224.565	233.581	242.552	251.508	260.470	269.528	278.432	287.485	
206.907	215.858	224.786	233.843	242.766	251.755	260.772	269.695	278.731	287.682	
207.000	216.000	225.000	234.000	243.000	252.000	261.000	270.000	279.000	288.000	

Tabelle 17: Skalierungsfaktoren der positionsabhängigen z-Schwindung

Position		Schwindungsfaktoren		Position		Schwindungsfaktoren	
X [mm]	Y [mm]	Z0 [%]	Z300 [%]	X [mm]	Y [mm]	Z0 [%]	Z300 [%]
16	16	1,90	1,51	128	125	2,57	1,80
44	16	2,06	1,55	156	125	2,62	1,72
72	16	2,19	1,62	184	125	2,41	1,61
100	16	2,25	1,58	16	152	2,19	1,69
128	16	2,41	1,51	44	152	2,29	1,78
156	16	2,32	1,54	72	152	2,32	1,86
184	16	2,15	1,51	100	152	2,35	1,84
16	44	1,98	1,63	128	152	2,42	1,79
44	44	2,11	1,69	156	152	2,30	1,76
72	44	2,30	1,73	184	152	2,32	1,59
100	44	2,34	1,72	16	179	2,34	1,65
128	44	2,59	1,69	44	179	2,40	1,80
156	44	2,36	1,66	72	179	2,43	1,80
184	44	2,36	1,50	100	179	2,49	1,81
16	71	2,10	1,65	128	179	2,53	1,76
44	71	2,34	1,74	156	179	2,45	1,71
72	71	2,37	1,80	184	179	2,40	1,56
100	71	2,60	1,75	16	206	2,59	1,69
128	71	2,45	1,78	44	206	2,57	1,82
156	71	2,51	1,70	72	206	2,64	1,80
184	71	2,49	1,54	100	206	2,75	1,76
16	98	2,12	1,70	128	206	2,72	1,73
44	98	2,30	1,82	156	206	2,67	1,72
72	98	2,38	1,84	184	206	2,55	1,59
100	98	2,32	1,87	16	233	2,41	1,76
128	98	2,42	1,82	44	233	2,38	1,81
156	98	2,45	1,75	72	233	2,50	1,80
184	98	2,34	1,60	100	233	2,55	1,79
16	125	2,36	1,64	128	233	2,51	1,78
44	125	2,46	1,80	156	233	2,64	1,69
72	125	2,54	1,87	184	233	2,39	1,66
100	125	2,55	1,86				



Tabelle 18: Messdaten der vordeformierten Probekörper zur Erfassung der z-Schwindung (Teil 1 von 3) (alle Werte in mm)

Position		Messfläche										
X	Y	MF(0)	MF(1)	MF(2)	MF(3)	MF(4)	MF(5)	MF(6)	MF(7)	MF(8)	MF(9)	MF(10)
16	16	8,992	18,042	26,992	35,979	44,925	53,963	62,933	71,934	80,964	90,023	98,927
44	16	9,008	18,040	27,017	35,988	45,009	54,032	63,042	72,029	81,047	90,088	99,042
72	16	8,986	18,016	26,999	35,946	44,977	53,989	62,995	71,964	80,990	90,017	98,973
100	16	8,980	17,986	26,937	35,919	44,945	53,975	62,954	71,926	80,954	89,980	98,960
128	16	8,950	17,976	26,950	35,922	44,947	53,941	62,997	72,041	81,036	90,032	98,991
156	16	8,969	17,974	26,992	35,930	44,972	53,936	62,953	71,958	80,995	89,966	98,976
184	16	8,998	17,966	26,985	35,973	44,969	53,970	62,983	72,011	81,009	90,002	98,990
16	44	8,990	18,045	26,953	35,937	44,988	54,040	63,053	71,983	80,912	89,985	98,962
44	44	9,001	18,003	27,007	35,935	44,982	53,970	62,958	71,951	80,984	89,988	98,937
72	44	8,987	18,021	27,004	35,951	44,945	53,971	62,958	71,917	80,926	90,040	99,047
100	44	8,961	18,022	27,002	35,944	44,949	53,974	62,988	72,020	81,020	90,032	98,972
128	44	9,039	18,067	27,041	36,005	45,060	54,086	63,113	72,160	81,154	90,155	99,182
156	44	8,998	17,976	27,006	35,949	44,942	53,927	62,919	71,930	81,028	90,003	98,982
184	44	9,010	18,011	27,019	36,034	44,988	54,008	63,014	72,037	81,007	90,032	99,033
16	71	9,047	18,047	27,000	35,947	44,981	54,025	63,003	71,971	80,999	90,033	98,972
44	71	9,006	18,014	26,958	35,929	44,947	53,966	62,966	72,006	81,025	90,033	98,999
72	71	9,009	18,015	26,970	35,924	44,924	53,934	62,971	71,985	80,947	89,970	99,018
100	71	8,981	18,008	26,961	35,916	45,026	54,023	63,079	72,079	81,060	90,083	99,127
128	71	8,965	18,001	26,969	35,949	45,049	54,019	63,020	71,989	80,977	90,058	99,025
156	71	9,016	17,988	26,968	35,926	45,025	54,019	63,029	72,001	81,076	90,087	99,082
184	71	8,961	17,983	27,032	36,003	45,082	54,075	63,088	72,107	81,077	90,082	99,088
16	98	8,982	18,026	26,965	35,910	44,960	53,981	62,920	71,916	80,942	89,963	98,990
44	98	9,012	17,991	26,914	35,896	44,924	53,917	62,856	71,845	80,963	89,958	98,934
72	98	9,000	17,983	26,910	35,865	44,897	53,983	62,958	71,930	80,926	89,899	98,912
100	98	9,013	18,007	26,999	35,913	44,909	53,921	62,915	71,964	80,945	89,944	98,905
128	98	9,000	17,978	26,966	35,911	44,912	53,995	62,965	71,965	80,944	90,028	98,972
156	98	9,026	18,019	26,991	35,973	45,067	54,047	63,023	72,037	81,045	90,104	99,073
184	98	8,988	18,004	26,995	36,015	44,971	53,983	62,966	72,011	80,971	89,963	99,075
16	125	9,012	18,078	27,021	35,948	44,952	54,028	62,997	71,932	81,048	90,093	99,030
44	125	8,977	18,051	27,046	35,948	45,029	54,046	62,998	71,991	80,960	90,082	99,035
72	125	8,955	18,003	26,940	35,871	44,998	53,969	62,966	72,008	81,008	89,989	99,021
100	125	9,017	18,029	26,984	35,957	45,050	54,027	63,049	72,083	81,063	90,043	99,063
128	125	8,988	17,979	26,990	35,926	45,011	54,002	63,029	72,056	81,004	90,014	99,015
156	125	9,023	17,982	27,031	36,035	45,021	54,004	63,016	72,089	81,065	90,060	99,082
184	125	8,964	17,988	26,983	35,995	44,971	53,976	63,046	72,098	81,052	90,069	99,054
16	152	9,013	18,037	26,930	35,885	44,911	53,979	62,892	71,864	80,881	89,950	98,923
44	152	8,982	18,011	26,948	35,900	44,901	53,905	62,870	71,827	80,911	89,918	98,908
72	152	8,995	17,994	26,914	35,901	44,910	53,893	62,923	71,937	80,916	89,904	98,872
100	152	8,961	18,001	26,968	35,881	44,885	53,903	62,920	71,924	80,891	89,904	98,913
128	152	9,027	17,975	26,942	35,903	44,895	53,999	63,011	71,938	80,906	89,909	98,964
156	152	9,026	17,940	26,871	35,891	44,910	53,869	62,877	71,850	80,916	89,905	98,897
184	152	9,018	17,968	26,978	35,994	44,967	53,952	62,966	71,977	80,937	89,930	98,901
16	179	8,992	18,019	26,939	35,869	44,895	53,960	62,922	71,844	80,848	90,006	98,921
44	179	9,030	17,991	26,964	35,880	44,863	53,974	62,967	71,901	80,866	89,884	98,882
72	179	8,988	18,034	27,015	35,936	44,905	54,018	62,997	71,957	80,911	90,012	98,989
100	179	9,034	17,995	26,923	35,874	44,992	53,969	62,930	71,908	80,990	89,965	98,967
128	179	9,015	18,019	27,009	35,973	45,068	54,026	63,044	72,080	81,045	90,037	99,036
156	179	8,994	17,998	26,980	35,921	45,008	54,012	62,980	71,983	80,940	89,934	98,926
184	179	8,979	17,998	26,983	35,995	44,956	53,968	63,053	72,087	81,040	90,030	99,003
16	206	8,986	18,063	26,994	35,922	45,038	54,081	63,048	72,074	81,066	90,115	99,081
44	206	8,994	17,993	26,957	35,886	44,984	53,985	62,964	72,004	80,963	89,986	98,995
72	206	9,003	18,052	27,045	36,015	45,003	54,124	63,061	72,017	80,973	90,090	99,055
100	206	9,031	17,962	26,995	35,984	45,062	54,070	63,058	72,111	81,066	90,058	99,101
128	206	9,012	17,984	26,966	36,021	45,003	54,116	63,061	72,053	81,119	90,125	99,120
156	206	9,021	17,993	27,023	36,045	45,013	54,130	63,145	72,097	81,151	90,158	99,161
184	206	8,956	17,970	26,980	35,966	45,039	54,040	63,005	72,045	81,084	90,085	99,059
16	233	8,982	18,020	26,943	35,905	44,945	54,052	63,007	71,949	80,960	89,993	98,996
44	233	9,011	18,039	26,973	35,926	44,919	54,054	63,029	71,965	80,923	89,972	98,936
72	233	9,017	18,087	27,080	36,002	45,048	54,076	63,051	72,011	81,044	90,085	99,081
100	233	8,967	17,999	26,952	35,915	44,973	54,010	63,057	72,045	80,995	90,035	99,076
128	233	9,000	18,000	26,956	35,949	45,017	54,046	63,005	72,006	81,049	90,071	99,067
156	233	8,973	18,014	27,081	36,068	45,069	54,162	63,113	72,144	81,129	90,215	99,212
184	233	9,004	18,052	27,024	36,055	45,000	54,027	63,098	72,145	81,069	90,079	99,085
<b>Sollwerte</b>		9,000	18,000	27,000	36,000	45,000	54,000	63,000	72,000	81,000	90,000	99,000

# 10 Anhang

Fortsetzung Tabelle 18 (Teil 2 von 3) (alle Werte in mm)

Messfläche										
MF(11)	MF(12)	MF(13)	MF(14)	MF(15)	MF(16)	MF(17)	MF(18)	MF(19)	MF(20)	MF(21)
107,873	116,897	125,962	134,953	143,910	152,930	162,003	171,006	179,962	188,980	198,025
108,054	117,053	126,110	135,035	143,964	152,974	162,043	171,049	179,996	188,999	198,045
107,979	116,982	126,029	135,036	143,973	152,995	162,044	171,040	179,995	189,006	198,036
107,941	116,948	125,991	134,988	143,925	152,950	161,995	170,974	179,938	188,964	197,983
108,034	117,025	126,038	135,012	144,027	153,035	162,037	170,955	179,907	188,933	197,920
107,977	116,975	125,969	134,967	143,960	152,981	161,979	170,987	179,984	188,985	197,969
108,039	117,007	126,013	135,003	144,044	153,027	162,041	171,043	180,069	188,958	197,952
107,909	116,930	125,986	134,967	143,912	152,944	162,008	171,068	180,035	189,064	198,101
107,946	116,953	126,085	135,047	144,026	153,037	162,073	171,075	180,007	189,024	198,047
108,013	116,999	126,022	135,036	143,971	152,965	162,093	171,063	180,032	189,041	198,055
107,991	116,977	125,989	134,986	144,018	153,017	162,042	171,043	179,980	188,977	197,978
108,212	117,183	126,212	135,188	144,184	153,123	162,151	171,163	180,217	189,189	198,193
108,015	116,988	125,976	134,993	143,976	152,934	161,941	170,933	179,940	189,014	197,994
108,046	117,020	126,025	135,023	144,037	153,017	162,016	171,044	180,037	189,013	198,008
107,983	116,989	126,029	135,034	143,963	152,982	162,019	171,062	180,046	189,081	198,108
107,986	116,993	126,003	135,026	144,036	153,044	162,060	171,014	179,988	189,107	198,101
108,003	116,969	126,001	134,932	143,918	152,989	162,014	170,980	179,945	188,911	198,033
108,117	117,089	126,107	135,149	144,137	153,110	162,144	171,072	180,060	189,053	198,145
108,002	116,992	125,992	134,988	144,035	153,004	161,997	171,018	180,038	189,031	198,026
108,048	117,011	126,042	135,029	144,093	153,058	162,061	171,044	180,037	189,011	198,004
108,102	117,052	126,055	135,075	144,081	153,047	162,041	171,080	180,054	189,029	198,021
107,995	117,016	126,055	134,997	143,960	152,985	162,030	171,012	179,931	188,963	198,083
107,889	116,880	125,998	134,961	143,912	152,910	161,931	170,905	179,939	188,947	197,948
107,943	116,929	125,934	134,936	143,946	152,926	161,940	170,956	179,950	188,944	197,940
107,876	116,938	125,951	134,904	143,863	152,932	161,952	170,953	179,973	188,941	197,941
107,965	116,941	125,942	134,939	143,976	152,943	161,939	170,947	179,972	188,949	197,940
108,067	117,045	126,023	135,054	144,100	153,056	162,065	171,033	180,006	188,982	198,086
108,095	117,026	126,018	135,016	144,046	152,985	162,002	170,969	180,001	188,966	197,953
108,003	117,024	126,060	134,972	143,961	152,965	162,011	170,943	179,917	188,920	198,057
108,012	116,970	126,106	135,053	144,018	152,971	162,008	170,997	180,034	188,977	198,015
108,025	116,986	125,994	135,039	143,996	152,975	162,080	171,019	179,984	188,962	198,064
108,076	117,053	126,035	135,019	144,045	153,026	162,117	171,063	180,024	189,000	198,102
108,044	117,007	126,006	135,029	144,026	152,976	161,989	171,028	180,016	188,955	197,955
108,117	117,083	126,074	135,090	144,114	153,075	162,093	171,030	180,038	189,003	198,003
108,067	117,009	126,022	135,016	144,015	152,967	161,980	170,965	179,962	188,925	197,933
107,839	116,833	125,912	134,832	143,779	152,775	161,851	170,843	179,823	188,825	197,878
107,847	116,801	125,823	134,807	143,824	152,778	161,809	170,740	179,718	188,779	197,797
107,841	116,900	125,892	134,851	143,810	152,876	161,893	170,818	179,795	188,877	197,868
107,910	116,873	125,900	134,855	143,795	152,847	161,872	170,791	179,782	188,844	197,848
107,942	116,895	125,913	134,922	143,826	152,874	161,884	170,855	179,809	188,871	197,862
107,873	116,816	125,817	134,816	143,869	152,807	161,828	170,791	179,770	188,713	197,821
107,931	116,993	125,981	134,994	143,978	152,940	161,930	170,933	179,925	188,881	197,872
107,891	116,875	125,947	134,880	143,817	152,804	161,877	170,837	179,752	188,748	197,806
107,898	116,860	125,895	134,885	143,891	152,851	161,883	170,810	179,783	188,842	197,871
107,936	116,873	125,897	134,873	143,917	152,845	161,874	170,901	179,888	188,833	197,849
107,884	116,954	125,950	134,894	143,861	152,812	161,920	170,858	179,821	188,785	197,879
107,971	117,018	126,011	134,962	143,943	152,894	162,000	170,982	179,906	188,995	197,870
107,981	116,932	125,939	134,909	143,866	152,812	161,934	170,919	179,884	188,825	197,821
108,034	116,978	125,982	134,961	143,971	152,901	161,916	170,909	179,898	188,854	197,838
108,117	117,087	126,153	135,125	144,035	152,994	162,064	171,048	180,049	189,029	198,090
107,995	116,929	125,970	134,970	143,956	152,892	161,926	170,949	179,918	188,863	197,886
107,998	117,033	126,084	135,012	143,965	152,997	162,038	170,995	179,939	188,990	198,011
108,089	117,048	126,066	135,068	144,080	153,027	162,037	171,038	180,047	189,003	198,007
108,161	117,101	126,137	135,049	144,047	153,092	162,109	171,088	180,033	188,985	197,985
108,127	117,056	126,176	135,145	144,131	153,057	162,086	171,118	180,142	189,082	198,080
108,078	117,010	126,018	134,983	143,990	152,931	161,948	170,936	179,927	188,869	197,864
107,982	116,968	126,028	134,958	143,894	152,967	162,045	170,981	179,902	188,882	197,958
107,972	116,915	125,982	134,911	143,876	152,935	161,975	170,918	179,874	188,933	197,969
108,005	117,033	126,079	135,040	143,993	153,010	162,057	171,016	179,976	188,996	198,038
108,074	117,010	126,045	135,058	144,067	153,015	162,053	171,051	179,975	189,027	198,047
108,031	117,052	126,086	135,081	144,048	152,975	162,109	171,112	180,052	188,990	198,008
108,189	117,138	126,159	135,182	144,211	153,162	162,175	171,179	180,136	189,083	198,092
108,089	116,998	126,009	135,072	144,108	153,007	162,034	171,037	180,035	188,936	197,954
108,000	117,000	126,000	135,000	144,000	153,000	162,000	171,000	180,000	189,000	198,000

Fortsetzung Tabelle 18 (Teil 3 von 3) (alle Werte in mm)

Messfläche									
MF(22)	MF(23)	MF(24)	MF(25)	MF(26)	MF(27)	MF(28)	MF(29)	MF(30)	MF(31)
207.012	215.976	225.001	234.040	242.961	251.949	261.004	270.043	278.996	287.957
206.990	216.000	225.002	234.041	243.011	251.964	261.009	270.039	279.031	287.952
207.024	215.983	225.014	234.015	242.982	251.936	261.007	270.006	279.004	288.011
206.953	215.925	224.953	233.963	242.950	251.876	260.926	269.938	278.905	287.854
206.931	215.900	224.913	233.902	242.850	251.757	260.793	269.764	278.671	287.618
206.979	215.964	224.981	233.948	242.889	251.830	260.846	269.825	278.804	287.800
206.949	215.965	224.968	233.941	242.938	251.923	260.976	269.956	278.871	287.835
207.103	216.031	225.061	234.100	243.043	252.014	261.133	270.179	279.120	288.098
207.034	216.088	225.112	234.103	243.112	252.122	261.177	270.176	279.103	288.078
207.022	215.986	225.086	234.100	243.073	252.027	261.030	270.049	279.063	288.069
207.002	216.025	225.019	234.009	243.005	251.946	260.961	270.066	279.008	287.963
207.184	216.164	225.129	234.122	243.128	252.045	261.134	270.064	278.995	287.972
206.997	215.985	224.979	233.950	242.970	251.901	260.965	269.904	278.840	287.853
206.944	215.926	224.899	233.869	242.867	251.886	260.882	269.751	278.749	287.751
207.081	216.031	225.074	234.089	243.087	252.110	261.145	270.159	279.101	288.067
207.072	216.043	225.056	234.043	243.024	252.061	261.093	270.087	279.031	287.994
207.013	215.964	224.953	233.950	242.942	251.965	261.018	269.964	278.974	287.971
207.089	216.087	225.072	234.072	243.047	251.988	260.986	269.976	278.938	287.902
206.967	215.961	224.962	234.020	242.970	251.960	260.982	269.950	278.958	287.964
207.005	216.056	225.034	234.035	243.024	251.980	260.963	269.958	278.923	287.910
207.007	216.019	224.996	233.967	242.869	251.871	260.845	269.832	278.792	287.742
207.017	215.994	225.012	234.039	243.020	252.042	261.075	270.097	279.102	288.090
206.964	215.961	224.971	233.973	242.986	251.987	260.987	270.077	278.991	287.983
206.941	215.964	224.942	233.946	242.929	251.948	260.951	270.033	278.985	287.951
206.943	215.969	224.953	234.042	242.978	251.949	261.060	270.019	279.014	288.037
206.946	215.990	224.969	233.937	242.969	251.966	260.994	269.938	278.967	287.959
207.083	216.032	225.006	233.999	243.004	251.939	260.929	270.019	278.993	287.957
206.993	215.955	224.928	233.894	242.872	251.893	260.898	269.815	278.760	287.727
207.005	215.965	224.968	234.017	242.933	251.915	260.909	269.958	278.919	287.835
207.040	216.048	225.009	234.006	242.979	251.933	261.069	270.022	278.941	287.913
207.019	215.969	224.951	234.059	243.040	251.978	260.939	270.033	279.000	287.931
207.079	216.002	224.983	234.074	243.037	251.993	260.969	270.046	278.974	287.947
206.957	215.900	224.865	233.950	242.921	251.864	260.901	269.832	278.864	287.746
207.042	216.058	225.028	233.994	242.996	251.959	260.947	269.896	278.884	287.847
206.921	215.918	224.864	233.871	242.912	251.871	260.814	269.811	278.833	287.812
206.817	215.771	224.779	233.933	242.904	251.812	260.837	269.872	278.825	287.724
206.771	215.717	224.788	233.804	242.728	251.717	260.782	269.805	278.757	287.707
206.863	215.878	224.866	233.854	242.861	251.855	260.847	269.921	278.902	287.919
206.869	215.865	224.834	233.818	242.837	251.836	260.815	269.800	278.817	287.798
206.822	215.781	224.753	233.849	242.831	251.788	260.752	269.721	278.756	287.744
206.805	215.778	224.718	233.724	242.726	251.783	260.726	269.728	278.728	287.780
206.906	215.871	224.728	233.702	242.707	251.707	260.673	269.642	278.646	287.635
206.760	215.685	224.805	233.851	242.813	251.737	260.745	269.782	278.703	287.625
206.814	215.769	224.749	233.868	242.826	251.786	260.757	269.864	278.795	287.756
206.806	215.772	224.840	233.814	242.788	251.756	260.780	269.805	278.756	287.705
206.846	215.813	224.759	233.776	242.790	251.797	260.755	269.745	278.764	287.756
206.822	215.794	224.904	233.847	242.824	251.797	260.800	269.737	278.682	287.672
206.778	215.779	224.744	233.723	242.712	251.697	260.788	269.719	278.732	287.690
206.858	215.830	224.887	233.674	242.653	251.677	260.634	269.604	278.562	287.503
207.016	215.981	224.979	234.017	242.941	251.920	260.938	269.932	278.850	287.805
206.863	215.898	224.866	233.887	242.843	251.809	260.875	269.871	278.839	287.782
206.991	215.914	224.891	233.903	242.881	251.811	260.907	269.881	278.834	287.792
206.966	215.939	224.897	233.898	242.899	251.837	260.801	269.786	278.734	287.712
206.965	215.934	224.868	233.887	242.854	251.852	260.776	269.781	278.766	287.734
207.046	216.056	225.008	233.986	243.025	251.982	260.943	269.899	278.859	287.872
206.862	215.866	224.825	233.795	242.789	251.825	260.714	269.627	278.652	287.639
206.955	215.926	224.939	234.000	242.913	251.891	261.013	270.003	278.917	287.883
206.948	215.891	224.960	233.968	242.935	251.933	260.976	270.008	278.987	287.921
207.046	215.987	224.924	233.947	242.991	251.999	260.974	269.949	278.940	287.988
207.005	215.999	224.946	233.965	242.998	252.032	260.981	269.987	278.954	287.927
207.053	216.084	225.037	234.031	243.037	252.025	261.011	270.054	279.031	288.016
207.085	216.063	225.006	234.036	243.000	252.025	260.950	269.964	278.949	287.924
206.979	215.978	224.898	233.892	242.906	251.936	260.914	269.829	278.853	287.838
207.000	216.000	225.000	234.000	243.000	252.000	261.000	270.000	279.000	288.000

Tabelle 19: Skalierungsfaktoren der positionsabhängigen z-Schwindung nach Vordeformation der Probekörper

Position		Schwindungsfaktoren		Position		Schwindungsfaktoren	
X [mm]	Y [mm]	Z0 [%]	Z300 [%]	X [mm]	Y [mm]	Z0 [%]	Z300 [%]
16	16	2,29	1,58	128	125	2,19	1,65
44	16	2,18	1,59	156	125	2,14	1,61
72	16	2,27	1,57	184	125	2,13	1,68
100	16	2,30	1,60	16	152	2,35	1,66
128	16	2,17	1,68	44	152	2,35	1,70
156	16	2,30	1,60	72	152	2,33	1,64
184	16	2,24	1,60	100	152	2,38	1,64
16	44	2,21	1,58	128	152	2,28	1,69
44	44	2,26	1,53	156	152	2,39	1,68
72	44	2,24	1,57	184	152	2,21	1,72
100	44	2,22	1,59	16	179	2,32	1,70
128	44	2,04	1,56	44	179	2,37	1,65
156	44	2,26	1,61	72	179	2,23	1,70
184	44	2,18	1,64	100	179	2,32	1,67
16	71	2,18	1,57	128	179	2,11	1,72
44	71	2,20	1,57	156	179	2,28	1,69
72	71	2,24	1,61	184	179	2,16	1,75
100	71	2,16	1,57	16	206	2,07	1,65
128	71	2,20	1,60	44	206	2,26	1,65
156	71	2,19	1,59	72	206	2,11	1,68
184	71	2,10	1,65	100	206	2,09	1,68
16	98	2,27	1,56	128	206	2,07	1,67
44	98	2,33	1,58	156	206	2,03	1,64
72	98	2,40	1,55	184	206	2,18	1,69
100	98	2,34	1,57	16	233	2,22	1,63
128	98	2,29	1,59	44	233	2,26	1,62
156	98	2,17	1,59	72	233	2,09	1,65
184	98	2,20	1,64	100	233	2,20	1,59
16	125	2,17	1,63	128	233	2,20	1,57
44	125	2,16	1,61	156	233	1,99	1,62
72	125	2,27	1,57	184	233	2,05	1,69
100	125	2,14	1,60				

## 10.6 Verwendeter Parametersatz

Soweit nicht anders angegeben, wurden für die Untersuchungen die in nachfolgender Tabelle 20 aufgelisteten Einstellungen für die Parameter verwendet. Die Parameter beziehen sich auf ein Lasersintersystem FORMIGA P 100 des Herstellers EOS GmbH Electro Optical Systems.

Tabelle 20: Auflistung des verwendeten Parametersatzes

Name des Parameters	Parameterwert	Parameter-einheit
<b>Materialparameter</b>		
Materialbezeichnung	PA 2200	-
Materialauffrischrate (Verhältnis Altpulver/Neupulver)	50	%
Materialabhängige Skalierung in x-Richtung	2,200	%
Materialabhängige Skalierung in y-Richtung	2,160	%
Materialabhängige Skalierung in z-Richtung bei Z = 0 mm (Z0)	2,200	%
Materialabhängige Skalierung in z-Richtung bei Z = 300 mm (Z300)	1,600	%
Strahlkompensation	0,290	mm
Bauraumtemperatur	170,5	°C
Entnahmekammertemperatur	150	°C
Minimale Aufheizdauer pro Kelvin Temperaturdifferenz	1,20	min
Schichtdicke	0,100	mm
Startschichtdicke	0,000	mm
Abschlusschichtdicke	4,000	mm
<b>Belichtungsparameter</b>		
Name des Belichtungsparameters	Mechanic	-
Konturbelichtung	aktiviert	-
Laserspotgeschwindigkeit bei Konturbelichtung	1500,0	mm/s
Laserleistung bei Konturbelichtung	16,0	W
Füllbelichtung	aktiviert	-
Laserspotabstand	0,25	mm
Laserspotgeschwindigkeit bei Füllbelichtung	2500,0	mm/s
Laserleistung bei Füllbelichtung	21,0	W
Skywriting	aktiviert	-
Alternierendes Füllmuster	aktiviert	-

### 10.7 Verwendete Programme

Für die Untersuchungen wurden die in Tabelle 21 benannten Programme verwendet.

*Tabelle 21: Auflistung der verwendeten Programme*

Name des Programms	Version	Hersteller, Ort, Land	Internetadresse
PSW	3.3	EOS GmbH Electro Optical Systems, Krailling, Deutschland	<a href="http://www.eos.info">www.eos.info</a>
Magics	16.0	Materialise NV, Leuven, Niederlande	<a href="http://www.materialise.com">www.materialise.com</a>
MATLAB	R2009b	The MathWorks Inc., Natick, USA	<a href="http://www.mathworks.de">www.mathworks.de</a>

## 10.8 Maschinenstundensatzrechnung

Tabelle 22: Berechnung des Maschinenstundensatzes für das untersuchte Lasersintersystem EOS FORMIGA P 100 (in Anlehnung an WARNECKE 1996 und LUTZMANN 2011)

Kostenart bzw. relevante Größe	Formelzeichen bzw. Formel	Einheit	EOS Formiga P 100
Wiederbeschaffungswert	$W_{WB}$	€	180.000
Nutzungsdauer	$t_{ND}$	a	8
Jährliche Nutzungszeit	$t_{NZ}$	h/a	1.760
Verfügbarkeit	$V_A$	%	90
<b>Abschreibungskosten</b>	$K_A = W_{WB} / (t_{ND} \cdot t_{NZ} \cdot V_A)$	€/h	<b>14,20</b>
Zinssatz	$Z_S$	%	8
<b>Kalkulatorische Zinskosten</b>	$K_Z = W_{WB} \cdot Z_S / (2 \cdot t_{NZ} \cdot V_A)$	€/h	<b>4,55</b>
Jährliche Raumkosten	$B_F$	€/(m <sup>2</sup> ·a)	200
Flächenbedarf der Anlage	$F_A$	m <sup>2</sup>	16
<b>Raumkosten</b>	$K_R = F_A \cdot B_F / t_{NZ}$	€/h	<b>1,82</b>
Nennleistung	$P_N$	kW	5,0
Strompreis	$K_{SP}$	€/(kWh)	0,19
Nutzungsfaktor	$N_F$	%	90
<b>Energiekosten</b>	$K_E = P_N \cdot K_{SP} \cdot N_F$	€/h	<b>0,86</b>
Instandhaltungskostensatz	$I_{KS}$	%	5
<b>Instandhaltungskosten</b>	$K_I = W_{WB} \cdot I_{KS} / (t_{ND} \cdot t_{NZ} \cdot V_A)$	€/h	<b>0,71</b>
Druckluftpreis (bei ca. 4 bar)	$K_D$	€/m <sup>3</sup>	0,01
Durchschnittlicher Druckluftverbrauch	$V_D$	m <sup>3</sup> /h	0,99
<b>Druckluftkosten</b>	$K_{DL} = K_D \cdot V_D$	€/h	<b>0,01</b>
<b>Maschinenstundensatz</b>	$K_{MH} = K_{AS} + K_Z + K_R + K_E + K_I + K_{DL}$	€/h	<b>22,14</b>





# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb- / Dichtungstoffe - Optimierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag  
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen  
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffwahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien  
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge  
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim fl xibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen  
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pfl ic t ?  
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand  
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effiz i t gestalten  
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und fl xibel am Markt  
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz d ch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der ebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offlin-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden  
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflussesuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozessmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schifferbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlweißens  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilbereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roggoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingler:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohr:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienz eigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlfl xibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauf ag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim chweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Gätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eirener:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
114 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickentrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmehranalytische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Loucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mürtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbigen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlinterns  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasieren förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formfl xibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer zur fl. xiblen Teillezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pömbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialfluss intensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwurfsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenn. xibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Rühstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorförmlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0

