

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und  
pulverbettbasierten Fertigung**

Dipl.-Ing. (Univ.)

**Michael Ott**

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. habil. Gerd Witt,  
Universität Duisburg-Essen

Die Dissertation wurde am 14.02.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 15.06.2012 angenommen.



## 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.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, dem Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen der Universität Duisburg-Essen, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

München, im Juli 2012

*Michael Ott*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Gegenwärtige Situation des produzierenden Gewerbes .....	1
1.2 Motivation der Arbeit .....	3
1.3 Zielsetzung.....	4
1.4 Vorgehensweise .....	6
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>9</b>
2.1 Vorgehensweise .....	9
2.2 Definitionen .....	9
2.3 Grundlagen der additiven Fertigung.....	11
2.3.1 Thematische Einführung.....	11
2.3.2 Prozesskette .....	11
2.3.3 Prozessvorbereitung.....	12
2.3.4 Additiver Fertigungsprozess.....	13
2.3.5 Folgeprozesse .....	15
2.4 Grundlagen der Schüttguttechnik .....	16
2.4.1 Schüttguldichte und Pulvereigenschaften.....	17
2.4.2 Kräfte und Spannungen .....	19
2.4.3 Spannungskreis .....	20

2.4.4	Haftkräfte.....	21
2.4.5	Einfluss der Partikelgröße auf die Korninteraktion.....	23
2.5	Zusammenfassung .....	24
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>25</b>
3.1	Vorgehensweise.....	25
3.2	Pulvercharakterisierung.....	25
3.2.1	Thematische Hinführung .....	25
3.2.2	Bewertungsmethoden zur Pulvercharakterisierung.....	26
3.2.3	Einordnung des Fließverhaltens von Schüttgütern.....	29
3.3	Auftragsmechanismen zur Pulverbereitstellung.....	31
3.3.1	Einordnung der Auftragsmechanismen .....	31
3.3.2	Pulverbettbasierte Konzepte .....	31
3.3.3	Pulverbettlose Fertigung.....	35
3.4	Prozessgestaltung .....	36
3.4.1	Prozessablauf .....	36
3.4.2	Prozesseinflussgrößen beim Strahlschmelzprozess.....	37
3.4.3	Alternative Verfestigungsmechanismen.....	39
3.5	Werkstoffe für Schichtbauverfahren .....	40
3.5.1	Vorgehensweise.....	40
3.5.2	Grundmaterialien .....	40
3.5.3	Hartstoffe .....	42
3.5.4	Materialkombinationen.....	44
3.6	Zusammenfassung und Handlungsbedarf .....	47
3.6.1	Zusammenfassung .....	47



3.6.2	Ableitung des Handlungsbedarfs .....	48
<b>4</b>	<b>Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung .....</b>	<b>51</b>
4.1	Motivation zur Prozessmodellierung .....	51
4.2	Modellierung der Multimaterialverarbeitung .....	51
4.2.1	Definition eines Prozessablaufes .....	51
4.2.2	Prozessablauf .....	52
4.3	Auswahl der Auftragsprinzipien .....	53
4.4	Beschreibung der Subprozesse .....	55
4.4.1	Vorgehensweise .....	55
4.4.2	Auftragsberechnung .....	55
4.4.3	Selektiver Pulverauftrag der Beschichtung .....	57
4.4.4	Selektives Belichten des Beschichtungspulvers .....	59
4.4.5	Flächiger Pulverauftrag des Substrates .....	61
4.4.6	Selektives Belichten des Substrates .....	62
4.4.7	Erkenntnisse aus der Modellierung .....	63
4.5	Steuerbarer Wärmehaushalt bei der Multimaterialverarbeitung .....	63
4.5.1	Auftretende Wärmeübertragungsmechanismen .....	63
4.5.2	Einfluss der Grundplattenvorheizung auf die Bauteilqualität ..	66
4.6	Zusammenfassung .....	69
<b>5</b>	<b>Fließfähigkeitsbewertung .....</b>	<b>71</b>
5.1	Notwendigkeit der Fließfähigkeitsbewertung .....	71
5.2	Bewertung der Fließfähigkeit .....	71
5.2.1	Materialauswahl .....	71
5.2.2	Scherversuch .....	73

5.2.3	Flussversuch .....	75
5.2.4	Korrelation von Scher- und Flussversuch .....	79
5.2.5	Modellbildung und Ergebnisinterpretation .....	80
5.3	Gestaltung des Auftragsmechanismus.....	86
5.4	Systementwicklung und Optimierung .....	91
5.5	Zusammenfassung .....	93
<b>6</b>	<b>Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität.....</b>	<b>95</b>
6.1	Werkstoffqualifizierung .....	95
6.1.1	Einfluss der Laserstrahlung .....	95
6.1.2	Verarbeitung von eindimensionalen Materialspuren .....	97
6.1.3	Beurteilung flächiger Materialverarbeitung .....	101
6.2	Bewertung der prozessbedingten Bauteileigenschaften.....	105
6.2.1	Motivation zur Bauteilcharakterisierung.....	105
6.2.2	Metallurgische Untersuchung.....	105
6.2.3	Thermische Eigenschaften.....	106
6.2.4	Mechanische Eigenschaften .....	109
6.2.5	Tribologische Eigenschaften .....	111
6.2.6	Chemische Eigenschaften.....	113
6.2.7	Technologische Eigenschaften .....	113
6.3	Festigkeit der Werkstoffkombination.....	117
6.3.1	Vorgehensweise zur Bewertung .....	117
6.3.2	Haftzugfestigkeit .....	117
6.3.3	Scherfestigkeit .....	119
6.4	Zusammenfassung .....	120

<b>7</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>121</b>
7.1	Motivation und Vorgehensweise .....	121
7.2	Festlegen der Referenz-Prozesse und -Bauteile .....	121
7.2.1	Auswahl der Prozesse .....	121
7.2.2	Definition der Referenz-Bauteile.....	122
7.3	Bewertungsmethodik und Kenngrößen .....	123
7.3.1	Einleitende Aspekte .....	123
7.3.2	Bewertungsklasse <i>Kosten</i> .....	123
7.3.3	Bewertungsklasse <i>Zeit</i> .....	125
7.4	Technische und wirtschaftliche Einordnung der Multimaterialverarbeitung .....	127
7.4.1	Fertigungsdauer .....	127
7.4.2	Gesamtkosten.....	128
7.4.3	Geometrische Bauteilkomplexität .....	129
7.5	Anwendungsszenarien mit Referenzgeometrie .....	130
7.5.1	Einleitende Aspekte .....	130
7.5.2	Tiefziehwerkzeug .....	130
7.5.3	Pelton-Turbinenschaufel.....	132
7.6	Zusammenfassung .....	134
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>137</b>
8.1	Zusammenfassung .....	137
8.2	Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten.....	139

<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>141</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>161</b>
10.1	Algorithmus für den selektiven Pulverauftrag .....	161
10.2	Flussdiagramme der kohäsionslosen Pulverfraktionen .....	162
10.3	Bewertungsmatrizen .....	163
10.3.1	Bewertungsklasse <i>Kosten</i> .....	163
10.3.2	Bewertungsklasse <i>Zeit</i> .....	167
10.4	Maschinenstundensatz.....	171
10.5	Berechnung der bauteilbezogenen Materialkosten .....	172
10.6	Berechnung der Gaskosten.....	174
10.7	Prozessdaten der additiven Fertigung und des Hochgeschwindigkeits- Flammspritzens.....	174
<b>11</b>	<b>Studienarbeiten .....</b>	<b>175</b>

## Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
3D-Drucken	dreidimensionales Drucken
Al	Aluminium
ASTM	American Society for Testing and Materials
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
©	Copyright
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design
CLI	Common Layer Interface
CLS	Ceramic Laser Sintering
CMMC	Ceramic reinforced Metal Matrix Composite
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
ca.	circa
d. h.	das heißt
DEM	Diskrete-Elemente-Methode
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direktes Metall-Laser-Sintern
EBM	Electron Beam Melting

## Abkürzungsverzeichnis

---

EBS	Electron Beam Sintering
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN	Europäische Norm
EOS	Electro Optical Systems (Firmenbezeichnung)
etc.	et cetera
e. V.	eingetragener Verein
FE	Finite Elemente
Fe	Eisen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FuE	Forschung und Entwicklung
g	Gramm
ggf.	gegebenenfalls
h	Stunde
HIP	Heißisostatisches Pressen
HV	Härte nach Vickers
HVOF	High-Velocity-Oxygen-Fuel (Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen)
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel
IMLS	Indirektes Metall-Laser-Sintern
ISO	International Organization for Standardization
J	Joule
K	Kelvin
LC	LaserCUSING <sup>®</sup>
LFA	Laser-Flash-Analyse

m	Meter
Mar-M247 <sup>®</sup>	Nickelbasis-Superlegierung (eingetragene Marke)
Mg	Magnesium
mm	Millimeter
min	Minute
Mo	Molybdän
MPP	Metal Printing Process
N	Newton
Ni	Nickel
nm	Nanometer
Nr.	Nummer
Nu	Nusselt-Zahl
O	Sauerstoff
®	eingetragene Marke
REM	Rasterelektronenmikroskop
Re	Reynolds-Zahl
P	Phosphor
Pr	Prandtl-Zahl
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
s	Sekunde
S.	Seite
Si	Silizium

## Abkürzungsverzeichnis

---

SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selektives Lasersintern
sog.	sogenannt
STL	Standard Triangulation Language
™	Trademark
Ti	Titan
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
UV	Ultraviolett
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
W	Watt
W	Wolfram
z. B.	zum Beispiel
Zr	Zirkonium
µg	Mikrogramm
µm	Mikrometer



## Verzeichnis der Formelzeichen

### Große lateinische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$A$	$m^2$	<i>Flächeninhalt</i>
$A_{I2}$	$J$	<i>Hamaker-Koeffizient</i>
$A_B$	$m^2$	<i>Fläche des Beschichtungswerkstoffes</i>
$A_D$	$m^2$	<i>Fläche der Düse</i>
$A_F$	$m^2$	<i>Fläche des Festkörpers bzw. Bauteils</i>
$A_P$	$m^2$	<i>Querschnittsfläche des Pulverbetts</i>
$A_S$	$m^2$	<i>Fläche des Substratwerkstoffes</i>
$E_A$	$W$	<i>absorbierte Energie</i>
$E_L$	$W$	<i>Energie des Laserstrahls</i>
$E_{th}$	$W$	<i>thermische Energie</i>
$E_V$	$W/mm^3$	<i>Energiedichte</i>
$F$	$N$	<i>Kraft</i>
$F_1, F_2$	$N$	<i>Scherkräfte</i>
$F_G$	$N$	<i>Gewichtskraft</i>
$F_H$	$N$	<i>Haftkraft</i>
$F_N$	$N$	<i>Normalkraft</i>
$F_S$	$N$	<i>Schubkraft</i>
$F_Z$	$N$	<i>Zugkraft</i>
$I$	$W/mm^2$	<i>Intensität der Laserstrahlung</i>
$I_0$	$W/mm^2$	<i>maximal auftretende Strahlungsintensität</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$K_{FP}$	€	Prozesskosten
$K_{MH}$	€	Maschinenstundensatz
$K_P$	€/kg	materialspezifische Pulverkosten
$L$	m	charakteristische Länge
$P_L$	W	Laserleistung
$Q$	J	Wärmemenge
$R_a$	µm	arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten
$R_{bm}$	N/mm <sup>2</sup>	Biegebruchfestigkeit
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit
$R_{max}$	µm	maximale Rautiefe
$R_z$	µm	gemittelte Rautiefe
$S_0$	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche
$T$	K	Temperatur
$T_\infty$	°C	Umgebungstemperatur
$T_{BP}$	°C	Temperatur der Bauplattform
$T_F$	°C	Temperatur des Festkörpers
$T_P$	°C	Temperatur des Pulverbetts
$U$	m	Flächenumfang
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$V_B$	m <sup>3</sup>	Volumen der Dosierbohrung
$V_H$	m <sup>3</sup>	Volumen der Hohlräume
$V_{Körner}$	m <sup>3</sup>	Volumen der Körner
$V_P$	m <sup>3</sup>	Pulvervolumen
$V_{Poren}$	m <sup>3</sup>	Volumen der Poren

$V_Z$	$m^3$	<i>Volumen der Zwischenräume</i>
$W$	$g/min$	<i>Verschleißrate</i>
$X, Y, Z$	-	<i>Seitenfläche des Schüttgutelements</i>

**Kleine lateinische Buchstaben**

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$a_L$	-	<i>Überlappungsgrad</i>
$a_P$	$m$	<i>Gitterweite der Pulverabgaben</i>
$a_{P,theo}$	$m$	<i>theoretische Gitterweite der Pulverabgabe</i>
$a_{th}$	$mm^2/s$	<i>Temperaturleitfähigkeit</i>
$b$	$m$	<i>Breite</i>
$b_L$	$m$	<i>Breite der belichteten Fläche</i>
$b_P$	$m$	<i>Breite der Pulverspur</i>
$c$	$mol/l$	<i>Konzentration</i>
$c_P$	$J/(kg \cdot K)$	<i>spezifische Wärmekapazität</i>
$d$	$m$	<i>Durchmesser</i>
$d$	-	<i>relative Dichte</i>
$d_A$	$m$	<i>Durchmesser der Auslassbohrung</i>
$d_B$	$m$	<i>Durchmesser der Dosierbohrung</i>
$d_D$	$m$	<i>Durchmesser der Düse</i>
$d_{D,max}$	$m$	<i>maximaler Düsendurchmesser</i>
$d_{D,min}$	$m$	<i>minimaler Düsendurchmesser</i>
$d_K$	$m$	<i>Partikeldurchmesser</i>
$d_{K50}$	$m$	<i>arithmetisch gemittelter Partikeldurchmesser</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$d_L$	$m$	<i>Fokusbildungsdurchmesser des Laserstrahls</i>
$d_P$	$m$	<i>Durchmesser der Pulverabgabe</i>
$d_{P,theo}$	$m$	<i>theoretischer Durchmesser der Pulverabgabe</i>
$d_S$	$m$	<i>Abstandsangabe</i>
$d_{Stutzen}$	$m$	<i>Durchmesser des Stutzens</i>
$e$	-	<i>Eulersche Zahl</i>
$e_p$	-	<i>Porenzahl</i>
$f(\dots)$	-	<i>mathematische Funktion</i>
$ff_c$	-	<i>Fließfähigkeit</i>
$ff_p$	-	<i>dichtegewichtete Fließfähigkeit</i>
$g$	$m/s^2$	<i>Gravitationskonstante</i>
$h$	$m$	<i>Höhe</i>
$h_B$	$m$	<i>Höhe der Dosierbohrung</i>
$h_D$	$m$	<i>Abstand zwischen Düse und Arbeitsebene</i>
$h_F$	$m$	<i>Höhe des Festkörpers</i>
$h_L$	$m$	<i>Hatch-Abstand</i>
$h_P$	$m$	<i>Höhe des aufgetragenen Pulvers</i>
$h_{P,max}$	$m$	<i>maximal auftragbare Pulverhöhe</i>
$h_{P,min}$	$m$	<i>minimal auftragbare Pulverhöhe</i>
$h_{Trichter}$	$m$	<i>Höhe des Trichters</i>
$i$	-	<i>Zählvariable</i>
$k_{FP}$	€	<i>bauteilspezifische Prozesskosten</i>
$k_{Ges}$	€	<i>bauteilspezifische Gesamtkosten</i>
$k_M$	€	<i>bauteilspezifischer Mitarbeiterstundensatz</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$k_{MH}$	€	<i>bauteilspezifischer Maschinenstundensatz</i>
$k_{MK}$	€	<i>bauteilspezifische Materialkosten</i>
$k_P$	€	<i>bauteilspezifische Pulverkosten</i>
$l$	<i>m</i>	<i>Länge</i>
$l_L$	<i>m</i>	<i>Länge der belichteten Fläche</i>
$l_P$	<i>m</i>	<i>Länge der Pulverbahn</i>
$m$	<i>kg</i>	<i>Masse</i>
$m, n$	-	<i>Zählvariablen</i>
$m_L$	<i>kg</i>	<i>Masse der verdrängten Luft</i>
$m_W$	<i>kg</i>	<i>Masse des verdrängten Wassers</i>
$\dot{m}$	<i>kg/s</i>	<i>Massenfluss</i>
$\dot{m}_A$	<i>kg/(s·mm)</i>	<i>Massenfluss pro Fläche</i>
$p$	<i>N/mm<sup>2</sup></i>	<i>Druck</i>
$q$	-	<i>Stückzahl</i>
$r$	<i>m</i>	<i>Radius</i>
$r_b, r_a$	<i>m</i>	<i>Radius der Pulverkörner</i>
$r_K$	<i>m</i>	<i>Radius des Pulverkorns</i>
$r_{K,W}$	<i>m</i>	<i>Radius der Oberflächenwelligkeit</i>
$r_L$	<i>m</i>	<i>Radius im Laserstrahlfokus</i>
$s$	<i>m</i>	<i>Abstand zwischen zwei Partikeln</i>
$s_0$	<i>m</i>	<i>Abstand zwischen Partikel und Wand</i>
$t$	<i>s</i>	<i>Zeit</i>
$t_F$	<i>s</i>	<i>Fertigungszeit</i>
$t_{Ges}$	<i>s</i>	<i>Gesamtfertigungszeit</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$t_L$	$s$	<i>Belichtungszeit</i>
$t_N$	$s$	<i>Bauteilaufbereitungszeit</i>
$t_P$	$s$	<i>Beschichtungszeit</i>
$t_{PV}$	$s$	<i>Zeit bei Produktvariation</i>
$t_V$	$s$	<i>Rüstzeit</i>
$v_D$	$mm/s$	<i>Geschwindigkeit der Düse</i>
$v_K$	$mm/s$	<i>Fließgeschwindigkeit der Körner</i>
$v_L$	$mm/s$	<i>Scan-Geschwindigkeit des Laserstrahls</i>
$v_S$	$mm/s$	<i>Geschwindigkeit der Schichtbelichtung</i>
$x, y, z$	-	<i>kartesische Koordinatenrichtungen</i>

## Griechische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha$	<i>Grad</i>	<i>Winkelvariable</i>
$\alpha$	$1/K$	<i>Längenausdehnungskoeffizient</i>
$\alpha_{th,P}, \alpha_{th,F}$	$W/(m^2 \cdot K)$	<i>Wärmeübertragungskoeffizient</i>
$\gamma_F$	-	<i>Rissdichte des Festkörpers</i>
$\Delta b_L, \Delta l_L$	$m$	<i>Breiten- und Längendifferenz zwischen Laserbahn und Pulverspur</i>
$\Delta h$	$m$	<i>Höhendifferenz der Scherverformung</i>
$\Delta xy$	-	<i>Auftragsqualität</i>
$\Delta \gamma$	<i>Grad</i>	<i>Winkeldifferenz der Scherverformung</i>
$\varepsilon$	-	<i>Porosität</i>
$\varepsilon_F$	-	<i>Emissivität des Festkörpers</i>
$\varepsilon_P$	-	<i>Emissivität des Pulvers</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$\varepsilon_{th}$	-	Wärmedehnung
$Z_F$	-	Fehlerkenngröße
$\lambda$	-	Horizontallastverhältnis des Pulvers
$\lambda_F$	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des Festkörpers
$\lambda_L$	nm	Wellenlänge des Laserstrahls
$\lambda_P$	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des losen Pulvers
$\eta_A$	-	Absorptionsgrad der Laserstrahlung
$\eta_P$	-	Pulverwiederverwendungsgrad
$\eta_P$	-	Wirkungsgrad des Teilprozesses
$\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>	Bezugsdichte
$\rho_b$	kg/m <sup>3</sup>	Schüttdichte
$\rho_F$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des Festkörpers
$\rho_{Fl}$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des Fluids
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Normalspannung
$\sigma$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\sigma_1, \sigma_2$	N/mm <sup>2</sup>	Hauptspannung
$\sigma_\alpha$	N/mm <sup>2</sup>	Normalspannung unter Winkel $\alpha$
$\sigma_c$	N/mm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit
$\sigma_h$	N/mm <sup>2</sup>	horizontale Normalspannung
$\sigma_m$	N/mm <sup>2</sup>	mittlere Normalspannung
$\sigma_r$	N/mm <sup>2</sup>	Radius im Mohrschen Spannungskreis
$\sigma_t$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit des Pulvers
$\sigma_v$	N/mm <sup>2</sup>	vertikale Normalspannung
$\sigma_{v0}$	N/mm <sup>2</sup>	Ausgangsniveau der vertikalen Normalspannung

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$\tau$	$N/mm^2$	<i>Schubspannung</i>
$\tau_\alpha$	$N/mm^2$	<i>Schubspannung unter Winkel <math>\alpha</math></i>
$\tau_w$	$N/mm^2$	<i>an der Oberfläche wirkende Schubspannung</i>
$\varphi$	<i>Grad</i>	<i>Wandreibungswinkel</i>
$\omega$	<i>Grad</i>	<i>Winkelvariable</i>



# 1 Einleitung

## 1.1 Gegenwärtige Situation des produzierenden Gewerbes

Unternehmen befinden sich in einem komplexen Spannungsfeld aus extrinsischen Einflussgrößen. Die sogenannten Megatrends zeigen Veränderungsprozesse auf, welche sich über viele Jahrzehnte erstrecken (ABELE & REINHART 2011). Für erfolgreich agierende Unternehmen ist es unabdingbar, sich den Herausforderungen der Megatrends zu stellen und diesen Wandlungsprozess aktiv mitzugestalten. So gewinnt der Umwelt- und Klimaschutz an Bedeutung (KRISTOF & HENNICKE 2009). Damit einhergehend ist die Verknappung der Ressourcen zu nennen (FAULSTICH ET AL. 2010). Die Entwicklung und Nutzung ressourceneffizienter Prozesse rückt zunehmend in den Fokus des produzierenden Gewerbes. Dies wiederum hat die Durchdringung bestehender Prozesse mit neuen Technologien zur Folge (ABELE 2010). Ein weiterer wichtiger Megatrend ergibt sich durch den technologischen Fortschritt. So werden durch neue Anwendungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie (z. B. Internet) neue Märkte erschlossen und die Globalisierung wird weiter vorangetrieben. Die daraus resultierende niedrigere Markteintrittsbarriere versetzt die weltweiten Märkte und damit die global agierenden Unternehmen in Dynamik (PILLER 2006). Um die Wettbewerbsfähigkeit und damit die Arbeitsplätze erhalten zu können, müssen diese Trends in der Entwicklung und Gestaltung zukünftiger Prozesse und Produkte frühzeitig berücksichtigt werden.

Neben den oben dargestellten global wirkenden Megatrends unterliegen die Märkte einem stetigen Wandel. So entwickeln sich einerseits aufstrebende Schwellenländer wie China, Indien, Südkorea, die Türkei, Brasilien und Russland zu neuen Industrienationen und treten damit als Technologieanbieter auf. Andererseits werden durch die fortlaufende Deregulierung der politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen sowie den technologischen Fortschritt weltweit neue Märkte erschlossen (WIRTH 2004). Die hochgradige Vernetzung, nicht zuletzt durch den Einsatz neuester informationstechnischer Medien, führt zu einem verschärften Wettbewerb und erhöht dadurch einerseits den Kostendruck, andererseits reduziert sie die Innovations- und Produktentwicklungszyklen (BAUMBERGER 2007). In dieser Verflechtung der Märkte zeichnet in den letzten Jahren besonders der hohe Kostenfaktor Arbeit am Standort Deutschland für den Verlust der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber asiatischen und osteuropäischen Ländern verantwortlich (BREUN 2006). Ein wichtiger Ansatz zur Aufrechterhal-

## 1 Einleitung

---

tung der Wettbewerbsfähigkeit ist es, durchgängige Prozessketten im Bereich der Produktionstechnik zu gestalten. Darüber hinaus sind Produkt- und kostensenkende Prozessinnovationen notwendig, um im internationalen Preiswettbewerb weiterhin bestehen zu können (ENGELN ET AL. 2007). Durch die starke Exportorientierung zeigen sich deutsche Unternehmen einerseits für oben genannte Einflüsse stark anfällig (SACHVERSTÄNDIGENRAT 2010), andererseits eröffnet diese aber auch die Chance, durch innovative Prozesse das Exportvolumen zu steigern. So konnte sich Deutschland bisher sehr gut im turbulenten Umfeld des Welthandels behaupten und hat 2009 nach China den zweitgrößten Warenexport erzielt (STATISTISCHES BUNDESAMT 2010).

Die oben erwähnten Schwellenländer lassen ein rasantes Wirtschaftswachstum erkennen und tätigen massive Investitionen in Forschung und Entwicklung. So hat China beispielsweise den weltweiten Anteil an FuE-Aufwendungen von 4 % (1996) auf knapp 11 % (2004) erhöht (ENGELN ET AL. 2007). Für eine dauerhafte Sicherung des produzierenden Gewerbes sowie die Durchsetzungsfähigkeit der deutschen Wirtschaft auf den internationalen Märkten werden deshalb hohe Anforderungen an die technologische Leistungsfähigkeit gestellt (ENGELN ET AL. 2007). Innovative Prozesse sind unabdingbar, um den wertschöpfenden Anteil des produzierenden Gewerbes halten bzw. erhöhen zu können.

Auf der einen Seite beeinflussen die oben aufgeführten Rahmenbedingungen das unternehmerische Handeln. Auf der anderen Seite übt das Kaufverhalten des Kunden Einfluss auf die Unternehmensausrichtung aus. Hier lässt sich ein Verhaltenswechsel in den Absatzmärkten, vom Verkäufer- hin zum Käufermarkt, erkennen (HOFFMANN 2003). Die Entwicklung dokumentiert, dass Produkte zunehmend kundenorientiert gestaltet und gefertigt werden (UHLMANN 2003). Die spezifischen Anforderungen des Kunden müssen in Zukunft stärker in die Wertschöpfungskette integriert werden (LINDEMANN ET AL. 2006). Die stetig steigende Individualisierung stellt das produzierende Gewerbe vor die Herausforderung, Bauteile selbst bei kleinen Stückzahlen bis hin zu einer „Losgröße 1“ wirtschaftlich herstellen zu können (WITT 2006). Es folgt daraus die vollständige kundenorientierte Herstellung von individuellen Produkten (*Mass Customization*) (ZÄH 2006). Um den damit verbundenen Anforderungen gerecht zu werden, ist es notwendig, die Flexibilisierung der Produkte und Prozesse voranzutreiben und so essentielle Wettbewerbsvorteile zu generieren. Darüber hinaus müssen zukunftsweisende Fertigungsprozesse die nötige Reaktionsfähigkeit besitzen, um auf die kundenindividuellen Wünsche eingehen zu können (REICHWALD 2005).

Für Unternehmen, die in oben gezeichnetem Spannungsfeld aus globalen Veränderungen, Wettbewerbern sowie gestiegenen Kundenanforderungen agieren, ist somit eine flexible und vor allem wirtschaftliche Fertigungstechnologie erforderlich, um erfolgreich und nachhaltig am Markt auftreten zu können.

Additive Fertigungstechnologien besitzen die notwendigen Eigenschaften, um als Unternehmen durch ihre Nutzung flexibel auf die sich ändernden Rahmenbedingungen reagieren zu können. So bieten die Schichtbauverfahren eine hohe geometrische Gestaltungsfreiheit zur Herstellung von komplexen und kundenindividuellen Produkten in kleinen Stückzahlen (WOHLERS 2009). Weiterhin verfügen sie über eine hohe Materialflexibilität, die es ermöglicht, Bauteile aus dem gewünschten Werkstoff aufzubauen (KRUTH ET AL. 2007). Nichtsdestoweniger können aus den identifizierten Rahmenbedingungen weitere Bedarfssfelder für die zukünftige Forschung abgeleitet werden. Die bisherigen Defizite der additiven, strahlbasierten Fertigungsprozesse führen zur Identifikation neuer Lösungsansätze.

## 1.2 Motivation der Arbeit

Die, im Vergleich zu den spanend abtragenden Fertigungsverfahren, junge Technologie der pulverbettbasierten Schichtbauverfahren besitzt durch die additive Vorgehensweise (vgl. Abschnitt 2.3.4) beim Verarbeiten formloser oder formneutraler Stoffe vielfältige geometrische Gestaltungsfreiheiten (ZÄH 2006). Darüber hinaus haben die additiven Fertigungsverfahren, insbesondere die Strahlschmelzverfahren, eine hohe Werkstoffflexibilität bei geringem Ressourcenverbrauch (BOURELL ET AL. 2009). Die Potentiale der Schichtbauverfahren wurden lange nur im Bereich des Prototypenbaus ausgenutzt, um bspw. den Entwicklungsprozess zu verkürzen. Es lässt sich aber ein verstärkter Übergang vom *Rapid Prototyping* hin zum *Rapid Manufacturing* erkennen (MEYER 2007). Die werkzeuglose Fertigung ermöglicht darüber hinaus die Produktion im Sinne des *Mass Customization* bei gleichzeitiger Verkürzung der *time-to-market* (REHME ET AL. 2004). Die sinkenden Stückzahlen erfordern zunehmend die Verfahrensflexibilität der additiven Prozesse (ZÄH ET AL. 2009A). Durch das breite Materialspektrum kann heute die Produktion von funktionalen, monomateriellen Bauteilen mit Serienqualität gewährleistet werden (KRUTH ET AL. 2007).

Werkstoffkombinationen lassen sich bislang allerdings nur durch die sogenannte Hybridbauweise (siehe Abbildung 2-2, Mitte) realisieren. Dabei können Materi-

## **1 Einleitung**

---

alvariationen in Aufbaurichtung vorgenommen werden. Dazu ist es notwendig, das erste Pulver aus dem Prozess vollständig zu entfernen und den zweiten, gewünschten Werkstoff in die Anlage zu füllen. Der Pulverwechsel erfolgt manuell bzw. teilautomatisiert und verhindert somit eine intensive Nutzung der Hybridbauweise (GLÄSER & KLOCKE 2009). Materialkombinationen in der Bauebene sind bisher nicht realisierbar. Dies wiederum hat zur Folge, dass im Sinne einer automatisierten und wirtschaftlichen Fertigung weitestgehend auf Materialkombinationen verzichtet wird. Somit muss der Konstrukteur bzw. die Konstrukteurin ggf. einen Kompromiss bei der Werkstoffauswahl eingehen. Es gilt die Anforderungen an das Bauteil zu priorisieren und den Pulverwerkstoff entsprechend der Bewertung auszuwählen. Eine eingeschränkte Funktionsfähigkeit, die sich beispielsweise in reduzierten Standzeiten und somit erhöhtem Wartungsaufwand niederschlagen kann, ist die Konsequenz.

Sollte für die Einsetzbarkeit des Bauteils eine Beschichtung unumgänglich sein, so sind Restriktionen für die geometrische Gestaltung hinzunehmen. Die Beschichtung von Bauteilen kann bislang nur durch konventionelle Technologien (z. B. thermisches Spritzen, Laserauftragschweißen) abgebildet werden. Diese Verfahren erfordern jedoch eine gute Zugänglichkeit zu den zu beschichtenden Funktionsflächen, was die vorhandene Gestaltungsfreiheit additiv erzeugter Formen unnötig einschränkt. Sollen sowohl die geometrischen Vorteile additiver Prozesse als auch die technologischen Vorzüge von Beschichtungen ohne Einschränkungen genutzt werden, so ist dies bislang nicht möglich. Die Motivation dieser Arbeit ergibt sich aus dem unzureichend ausgeschöpften Potential der metallischen strahl- und pulverbettbasierten Schichtbauverfahren im Bereich der Materialkombinationen.

### **1.3 Zielsetzung**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erforschung des additiven Prozesses zur Multimaterialverarbeitung, insbesondere zur Herstellung von Beschichtungen, bei metallischen, strahl- und pulverbettbasierten Schichtbauverfahren. Dieser Fokus lässt sich in zwei Bereiche gliedern, die sich aus den Herausforderungen der additiven Fertigungsverfahren ergeben (siehe Abbildung 1-1).

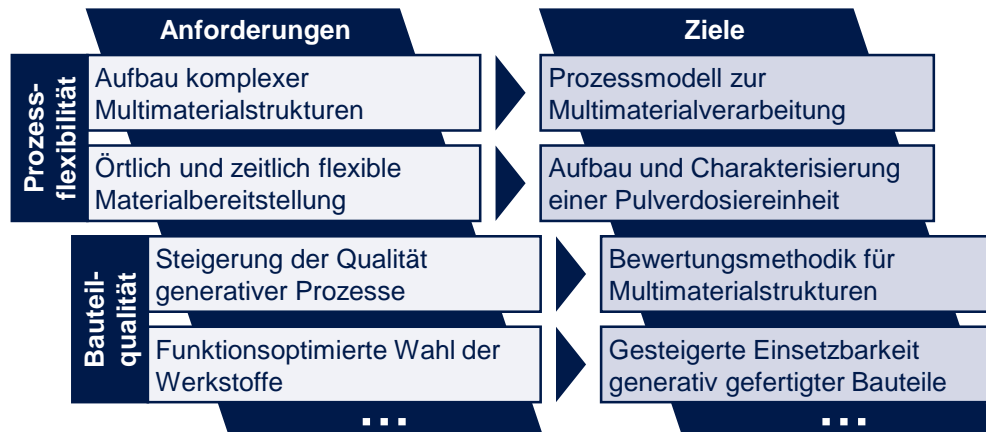


Abbildung 1-1: Darstellung der Anforderungen und der sich daraus ergebenden Ziele

Die Anforderungen im Bereich der additiven Fertigungsverfahren sind durch die zunehmende Flexibilisierung des Prozesses geprägt. Die steigende Kundenindividualität der Produkte bei wenigstens gleichbleibend hohen Qualitätsanforderungen verlangt neue Methoden zur Flexibilitätssteigerung, um damit den Aufbau von komplexen Multimaterialstrukturen zu ermöglichen. Dazu zählen beispielsweise die Beschichtung von innenliegenden oder schwer zugänglichen Funktionsflächen. Darüber hinaus gibt es im Bereich der Pulverhandhabung bei strahl- und pulverbettbasierten Systemen nur vereinzelte Forschungsansätze, örtlich und zeitlich flexibel Material bereitzustellen. Diese Restriktionen limitieren die Prozessflexibilität und führen deshalb zu den Teilzielen der vorliegenden Arbeit. So ist ein Prozessmodell auf Basis additiver Fertigungsverfahren zur dreidimensionalen Multimaterialverarbeitung (vgl. Abschnitt 2.2) zu erforschen. Die Flexibilisierung der Materialbereitstellung erfordert des Weiteren die Charakterisierung von nicht kohäsiven Pulverwerkstoffen mit dem Ziel, eine Dosiereinheit für die Handhabung und die gezielte Pulvereinbringung zu konzeptionieren.

Weiterhin ist die Bauteilqualität für die Akzeptanz des multimateriellen Schichtbauverfahrens essentiell. Eine sogenannte *first-time-right*-Fertigung kann meist nur für einfache Volumenkörper sichergestellt werden. Die Forderung nach funktionsoptimierten Bauteilen bedingt, dass das geometrische Potential additiver Prozesse ausgenutzt wird, damit individuelle und komplexe Strukturen gefertigt werden können. Dazu gehören auch dreidimensionale Materialkombinationen, um für Bauteilfunktionen die bestmöglichen Werkstoffeigenschaften bereitzustellen. Dies führt zum Teilziel, additiv erzeugte Bauteile in ihrer Einsetzbarkeit

## 1 Einleitung

---

zu steigern. Um die Eignung des Bauteils für die vorausgesetzten Erfordernisse dokumentieren zu können, ist es erforderlich, die Gesamtheit der Merkmale der Multimaterialstruktur zu beurteilen. Deshalb ist es unerlässlich, eine Bewertungsmethodik aufzubauen, um die Bauteilqualität der Multimaterialstrukturen zu charakterisieren, was das vierte Teilziel dieser Arbeit darstellt.

Die Multimaterialverarbeitung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand einer industrierelevanten Werkstoffkombination, bestehend aus Stahl (1.2709 bzw. X3NiCoMoTi18-9-5) und Hartmetall (WC/Co 88/12 und 83/17), erforscht. Die Auswahl der Pulver wurde unter Berücksichtigung der Verarbeitbarkeit (z. B. Korngrößenverteilung) im Strahlschmelzprozess getroffen. Notwendige Kennwerte sowie die Validierung der erarbeiteten Modelle werden für beide Materialien ermittelt.

Die Rahmenbedingungen zur Bearbeitung oben genannter Zielsetzungen wurden vom Forschungsverbund „*ForLayer – Entwicklung innovativer Schichten zur Verschleißreduktion an Werkzeugen bei komplexen Belastungen*“ bereitgestellt, welcher von der Bayerischen Forschungsförderung gefördert wurde. Im Rahmen des ersten Teilprojektes „*Entwicklung hybrider Fertigungsverfahren zur integrierten Herstellung und Beschichtung von hoch beanspruchten Werkzeugen und Bauteilen (HybriLay)*“ wurden die nachfolgenden Inhalte erarbeitet.

### 1.4 Vorgehensweise

Um oben dargestellte Ziele zu erreichen, ist eine methodische Vorgehensweise unabdingbar (siehe Abbildung 1-2).

Nach erfolgter Einordnung des Themas in das produktionstechnische Umfeld (vgl. Abschnitt 1.1) wird ein einheitliches Verständnis der verwendeten Begrifflichkeiten geschaffen (vgl. Abschnitt 2.2). Darüber hinaus werden die Grundlagen zur Bearbeitung der gestellten Ziele (siehe Abbildung 1-1) geschaffen. Dabei werden allgemeingültige Inhalte sowohl der additiven Fertigungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.3) als auch der Schüttguttechnik (vgl. Abschnitt 2.4) beleuchtet. In Abschnitt 2.3 wird die gesamte Prozesskette, bestehend aus der Prozessvorbereitung, dem Schichtbauprozess sowie den Folgeprozessen, der additiven und pulverbettbasierten Fertigungsverfahren, erläutert. Im Bereich der Schüttguttechnik gilt es, die Pulverpartikel zu charakterisieren und wichtige Einflussgrößen der Handhabung für technische Prozesse aufzuzeigen.

<b>1. Einleitung</b>				
<b>2. Grundlagen</b>	Generative Fertigung	Schüttguttechnik		
<b>3. Stand der Forschung und Technik</b>	Pulvercharakterisierung	Werkstoffe		
	Auftragsmechanismen	Prozessgestaltung		
<b>4. Multimaterialverarbeitung im Kontext der strahl- und pulverbettbasierten generativen Fertigung</b>	Prozessablauf			
	Subprozess: Pulverauftrag	Subprozess: Belichten	Randbedingung: Wärmehaushalt	
<b>5. Fließfähigkeitsbewertung mit dem Ziel des präzisen Pulverhandlings</b>	Pulvercharakterisierung		Pulverhandlung	
	Übertrag auf die generative Fertigung Systementwicklung & Optimierung			
	<b>6. Bauteilcharakterisierung und Bauteilqualität</b>			Prozesseignung
				Bauteileigenschaften
Bewertungsmethodik für Multimaterialstrukturen			Materialkombination	
<b>7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	Methodik	Benchmark	Anwendungsszenario	
<b>8. Schlussbetrachtung</b>				

*Abbildung 1-2: Methodische Vorgehensweise im Rahmen der vorliegenden Arbeit*

Im nachfolgenden Kapitel wird der Stand der Forschung und Technik dargestellt (vgl. Kapitel 3). Dieser lässt sich in die Abschnitte Pulvercharakterisierung (vgl. Abschnitt 3.2), Auftragsmechanismen zur Pulverbereitstellung (vgl. Abschnitt 3.3), Prozessgestaltung bei pulverbettbasierten, additiven Technologien (vgl. Abschnitt 3.4) sowie Werkstoffe für Schichtbauverfahren (vgl. Abschnitt 3.5) gliedern. Der Aufbau des Kapitels orientiert sich dabei am Schichtbauprozess, ausgehend vom Pulver, über die Pulverbereitstellung, den Prozessablauf bis hin zu den Werkstoffen, die bislang verarbeitbar sind. Die Forschungsthemen werden am Ende des Kapitels zusammengefasst und die eigene Arbeit wird in den Kontext der erzielten Forschungsergebnisse eingeordnet (vgl. Abschnitt 3.6).

Kapitel 4 spezifiziert die Multimaterialverarbeitung im Kontext der strahl- und pulverbettbasierten additiven Fertigung und dazu wird ein Prozessablauf erarbeitet (vgl. Abschnitt 4.2). Darauf aufbauend werden die Auftragsprinzipien ausgewählt (vgl. Abschnitt 4.3) sowie die dazugehörigen Modelle der Subprozesse spezifiziert (vgl. Abschnitt 4.4). Die Entwicklung einer Grundplattenvorheizung, welche für die Multimaterialverarbeitung unerlässlich ist (vgl. Abschnitt 4.5), rundet das Kapitel ab.

## 1 Einleitung

---

Nachdem das methodische Konstrukt erarbeitet wurde, gilt es, die Fließfähigkeitsbewertung (vgl. Kapitel 5) und die Prozesseignung von Materialien sowie die erzielbare Bauteilqualität (vgl. Kapitel 6) zu betrachten.

Die Charakterisierung der Pulversysteme kann auf verschiedenen Wegen durchgeführt werden. Im Abschnitt 5.2 werden deshalb der konventionelle Scherversuch und ein adaptierter Flussversuch einander gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse wird ein Auftragsmechanismus konzipiert, der die pulverbettbasierte Fertigung hin zur Multimaterialverarbeitung erweitert (vgl. Abschnitt 5.3). Im finalen Abschnitt des Kapitels erfolgt die Systementwicklung und Optimierung des Auftragsprozesses (vgl. Abschnitt 5.4).

Das Kapitel 6 beinhaltet eine Bewertungsmethode zur ganzheitlichen Charakterisierung sowohl von Werkstoffen für den Strahlschmelzprozess als auch von Bauteilen, im Speziellen von Multimaterialstrukturen, welche durch die Werkstoffkombination umfassendere Prüfmethoden als bei monomateriellen Bauteilen erfordern. Die ausgewählten Pulver werden schrittweise für den Strahlschmelzprozess qualifiziert (vgl. Abschnitt 6.1). Die ermittelten Prozessparameter dienen als Grundlage für die Bewertung der prozessbedingten Bauteileigenschaften (vgl. Abschnitt 6.2) sowie der spezifischen, aus der Werkstoffkombination resultierenden Eigenschaften (vgl. Abschnitt 6.3).

Den inhaltlichen Abschluss der Arbeit bildet die technische und wirtschaftliche Bewertung des Multimaterialverarbeitungsprozesses (vgl. Kapitel 7). Zu Beginn wird die zu Grunde liegende Vorgehensweise (vgl. Abschnitt 7.2) und Methodik (vgl. Abschnitt 7.3) erläutert. In der darauffolgenden Bewertung wird ein zweistufiges Vorgehen gewählt. Im ersten Schritt erfolgt ein Vergleich ausgewählter Referenz-Prozesse, basierend auf geometrisch definierten Referenzgeometrien (vgl. Abschnitt 7.4). Im zweiten Schritt wird die Bewertung des Prozesses anhand zweier industrierelevanter Anwendungsbeispiele (vgl. Abschnitt 7.5) aus dem Werkzeug- und Formenbau sowie der Hydroenergie durchgeführt.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse (vgl. Abschnitt 8.1) sowie einem Ausblick für weitere Forschungsansätze (vgl. Abschnitt 8.2).



## 2 Grundlagen

### 2.1 Vorgehensweise

Das vorliegende Kapitel definiert die Nomenklatur, die in dieser Arbeit Verwendung findet (siehe Abschnitt 2.2). Darüber hinaus werden die Grundlagen der additiven Fertigungsverfahren (siehe Abschnitt 2.3) sowie die der Schüttguttechnik (siehe Abschnitt 2.4) behandelt. Die beiden letztgenannten Abschnitte dienen darüber hinaus dazu, die Arbeit in den richtigen produktionstechnischen Kontext einzuordnen und so den Betrachtungsraum zu spezifizieren.

### 2.2 Definitionen

Der Abschnitt „Definitionen“ soll ein einheitliches Verständnis der verwendeten Begrifflichkeiten schaffen. *Additive* oder auch *generative* Fertigungsverfahren können in vielerlei Hinsicht klassifiziert werden. Dies ist auf die mannigfaltigen Bezeichnungen der Prozessvarianten sowie auf die vielfältigen verarbeitbaren Werkstoffe zurückzuführen. So können die Schichtbauverfahren abhängig vom Materialaufschmelzgrad in Sinter- und Schmelzprozesse unterteilt werden (siehe Abbildung 2-1). KRUTH ET AL. haben in einer schematischen Klassifizierung alle Möglichkeiten der Verfestigung von formlosen bzw. -neutralen Materialien zusammengefasst (KRUTH ET AL. 2005).

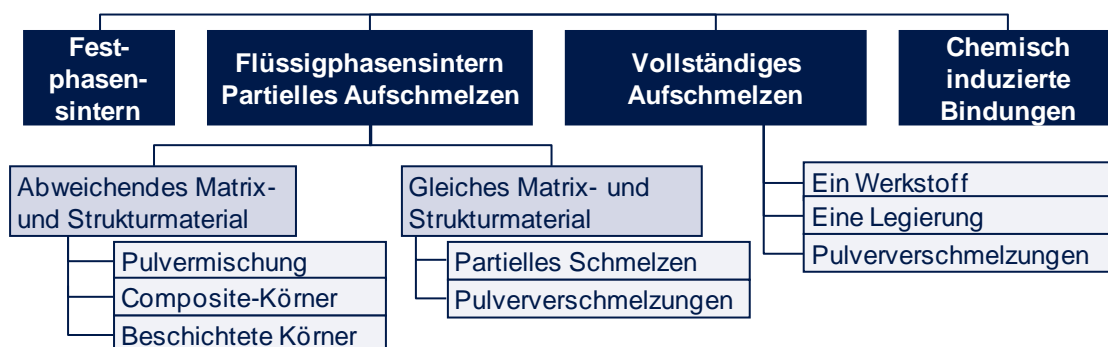


Abbildung 2-1: Grundtypen der additiven Fertigungsverfahren (nach Kruth et al. 2005)

Die Einteilung der Mechanismen erfolgt in vier Klassen. Neben dem bereits genannten Flüssigphasensintern (KRUTH ET AL. 2007) und dem vollständigen Aufschmelzen (Strahlschmelzen) gibt es noch Festphasensintern und chemisch

## 2 Grundlagen

---

induzierte Bindungen, um einzelne Schichten zu Bauteilen zu fügen. Den beiden erstgenannten Klassen lassen sich sowohl strahlbasierte als auch alternative Verfestigungsmechanismen (z. B. Druck) zuordnen (vgl. Abschnitt 3.4.2 und Abschnitt 3.4.3). Für die beiden letztgenannten Mechanismen ist es nicht möglich, auf einen strahlbasierten Prozess zurückzugreifen.

So lassen sich die Prozesse LaserCUSING<sup>®</sup> (LC), Direktes Metall-Laser-Sintern (DMLS) sowie Selective Laser Melting (SLM) unter dem Begriff *Laserstrahlschmelzen* zusammenfassen, falls das Material vollständig aufgeschmolzen wird (VDI 3404 2009). Verfahren für komplexe Materialsysteme, bestehend aus zwei oder mehr Komponenten mit unterschiedlichen Schmelzpunkten, werden dagegen unter dem Begriff *Laserstrahlsintern*, aufgrund des nur partiellen Aufschmelzens, vereint.

Die additiven Fertigungsverfahren offerieren die Möglichkeit, mehrere Materialien in einem Bauteil zu vereinen. Es gilt den Begriff der Hybridbauweise und der Multimaterialverarbeitung zu spezifizieren und eine Einordnung vorzunehmen. Entsprechend der DUDENREDAKTION hat „hybrid“ unter anderem die Bedeutung „von zweierlei Herkunft“ oder „aus Verschiedenem zusammengesetzt“ (DUDENREDAKTION 2003). Im Bereich der additiven Prozesse kann die Hybridbauweise zwei Sachverhalte bedeuten. Zum einen wird darunter die Kombination von zwei Fertigungstechnologien (z. B. Fräsen und Strahlschmelzen) verstanden, zum anderen die Verbindung zweier Werkstoffe in einer Dimension (HERZOG 2002). Ein exemplarisches Hybridbauteil ist in nachstehender Abbildung 2-2 in der Mitte dargestellt.

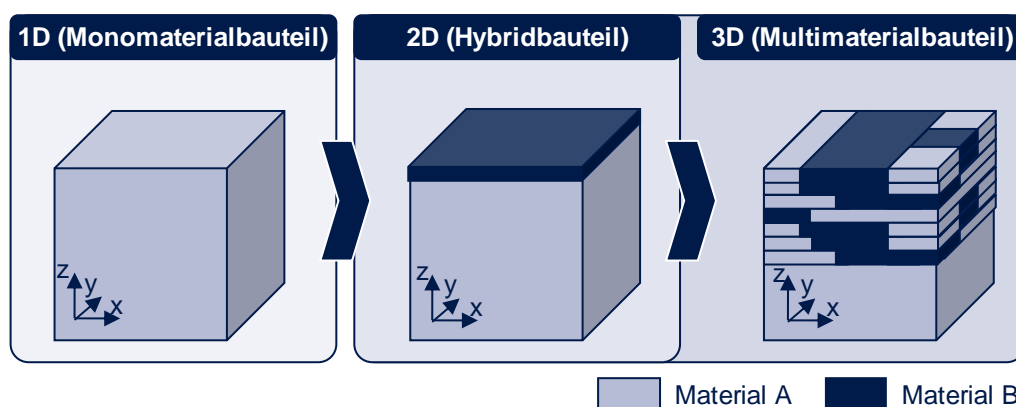


Abbildung 2-2: Abstufung der Multimaterialverarbeitung bezüglich der involvierten Dimensionen

Die Kombination von wenigstens zwei Werkstoffen zu einer stoffschlüssigen Struktur wird als *Multimaterialbauteil* bezeichnet. Der dazugehörige Prozess kann als *Multimaterialverarbeitung* definiert werden. Die geometrische Anordnung der Werkstoffe wird dadurch noch nicht festgelegt (siehe Abbildung 2-2).

Der höchste Grad der Multimaterialverarbeitung ist demnach die Herstellung von Werkstoffwechseln in allen Raumrichtungen (3D). Alle anderen Bauteilvarianten (1D, 2D) können als Vereinfachungen davon betrachtet werden. Wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff *Multimaterial* verwendet, so ist damit stets die dreidimensionale Ausprägung gemeint.

## 2.3 Grundlagen der additiven Fertigung

### 2.3.1 Thematische Einführung

Strahlbasierte Schichtbauverfahren repräsentieren die größte Gruppe im Bereich der metallischen, additiven Fertigungsverfahren (WOHLERS 2009). Zum weiteren Verständnis der Arbeit werden an dieser Stelle die fundamentalen Verfahrensprinzipien ausführlich dargestellt. Neben der detaillierten Erläuterung des Kernprozesses finden sich in diesem Abschnitt auch die Beschreibungen der peripheren Prozessvorbereitung und der Folgeprozesse.

Die additiven Fertigungsverfahren können in pulverbettbasierte sowie in pulverbettlose Systeme aufgeteilt werden (LEVY ET AL. 2003, WOHLERS 2007). Es wird im Anschluss nur auf den erstgenannten additiven Fertigungsprozess eingegangen.

### 2.3.2 Prozesskette

Durch die werkzeuglose Fertigung physischer Modelle mittels additiver Verfahren ist eine schnelle, flexible und direkte Herstellung aus den 3D-CAD-Daten möglich. Die dazu notwendigen Prozessketten können nach VDI 3404 in drei Kategorien aufgeteilt werden (VDI 3404 2009) (siehe Abbildung 2-3):

- Direkter Prozess: Aus dem Bauprozess kann ein direkt einsetzbares Bauteil entnommen werden.
- Direkter mehrstufiger Prozess: Zur Gewährleistung der Einsetzbarkeit sind noch nachfolgende Prozesse erforderlich.

## 2 Grundlagen

---

- Indirekter Prozess: Dieser definiert ein Urmodell oder ein Werkzeug für einen anschließenden Fertigungsprozess.

### Prozesskette für direkte (mehrstufige) Prozesse



### Prozesskette für indirekte Prozesse



Abbildung 2-3: Direkte und indirekte Prozesskette für die additive Fertigung (VDI 3404 2009)

Für jede der drei genannten Kategorien ist die Prozessvorbereitung unumgänglich und wird deswegen im anschließenden Abschnitt erklärt.

### 2.3.3 Prozessvorbereitung

Schichtbauverfahren finden zunehmend wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten in sehr unterschiedlichen Branchen (z. B. Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik oder Werkzeug- und Formenbau) (WOHLERS 2009). Dies ist neben der schnellen Fertigstellung der Bauteile auch auf einzigartige Technologievorteile zurückzuführen. So können Werkzeuge durch den Schichtbauprozess mit konturnahen Temperierkanälen oder in Hybridbauweise aufgebaut werden (MAYER 2009). Die Teilung der Werkzeugform in den Grundkörper und die komplexe, formgebende Kavität ist ein wichtiger Schritt in den Prozessvorbereitungen, da der Grundkörper und die Kavität u. U. mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt werden. Die Kavität wird durch das Schichtbauverfahren mit dem Grundkörper stoffschlüssig verbunden.

Der Einsatz des Transfermodells setzt, abhängig vom angeschlossenen Fertigungsprozess, eine minimal tolerierte Oberflächengüte voraus. Additiv gefertigte Formeinsätze weisen in der Regel eine zu hohe Oberflächenrauheit auf, sodass eine mechanische Nacharbeit bei den Folgeprozessen (vgl. Abschnitt 2.2.4) meist unumgänglich ist. Das dabei abzuhebende Volumen gilt es in der Bauteilmodellierung zu berücksichtigen und die Funktionsflächen mit einem ausreichenden Aufmaß zu beaufschlagen. Sind alle geometrischen Spezifikationen definiert, kann das virtuelle Produktmodell für den Bauprozess aufbereitet werden. Als

Schnittstelle fungiert i. d. R. das *STL*-Format, das sich als Quasi-Industriestandard etabliert hat (GEBHARDT 2007). Unter Verwendung einer hohen Anzahl an Dreiecken wird die Geometrie oberflächenbasiert beschrieben. Für die physische Fertigung der Bauteile ist es erforderlich, das virtuelle Produktmodell im Bauraum der Anlage zu orientieren und die für den Bauprozess erforderlichen Schichtinformationen abzuleiten (ZÄH 2006). Dies geschieht durch „Slicen“, d. h. es werden einzelne Schichten mit konstanter Höhe aus dem 3D-Produktmodell geschnitten. Die so erhaltenen Schichtinformationen werden beispielsweise im *CLI*-Format, einer systemübergreifenden und anlagenneutralen Form, gespeichert. Das Format umfasst die innere und äußere Kontur- sowie Flächeninformation der Schnittebene (siehe Abbildung 2-4). Der Datensatz wird durch die prozess- und maschinenspezifischen Parameter ergänzt.

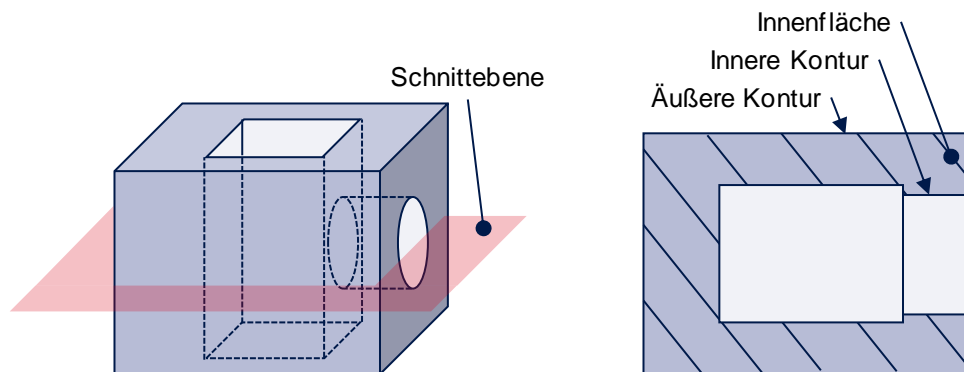


Abbildung 2-4: 3D-Musterbauteil und Schnitt zur Darstellung der Konturen und Flächen (vgl. Gebhardt 2007)

Darüber hinaus sind die Schichthöhe und prozessspezifische Daten (z. B. Strahlleistung) enthalten. Die generierten Schichten werden dem additiven Fertigungsprozess zur Verfügung gestellt.

### 2.3.4 Additiver Fertigungsprozess

Die Vorgehensweise der Schichtbauverfahren, insbesondere des Strahlschmelzprozesses, soll im Folgenden beschrieben werden. Das zugrunde liegende Prinzip beruht, im Gegensatz zu den klassischen abtragenden bzw. spanabhebenden Verfahren, nicht auf dem Entfernen von überschüssigem Volumen, sondern auf Aneinanderfügen von 2 ½-dimensionalen Volumenelementen, i. d. R. einzelnen Schichten, den sog. Bauebene. Der Prozess basiert somit auf einem flächigen Volumenwachstum (GEBHARDT 2007).

## 2 Grundlagen

Der Schichtbauprozess beinhaltet für jede Ebene stets dieselbe Schrittfolge (siehe Abbildung 2-5). Zu Beginn wird die Schichthöhe für den Materialauftrag eingestellt. Liegt das Ausgangsmaterial in fester, pulverisierter Form vor, so ist dies durch das Absenken der Bauplattform (4) möglich. Der Beschichter wird nun mit Pulver aus der Bevorratung (1) beaufschlagt und füllt den entstandenen pulverleeren Raum mit neuem Material auf. Entscheidend für diesen Prozess ist die angebrachte Auftragsklinge (2), die bezogen auf ihre mechanische Festigkeit sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann und für eine gleichmäßige Pulvernivellierung sorgt. Abschließend werden die im virtuellen Schichtmodell hinterlegten Geometrieinformationen durch hochenergetische Strahlung auf das Pulverbett übertragen. Im Bereich der metallischen Werkstoffe finden vorwiegend energiereiche Einzelstrahlen wie Laser- (MEINDL 2005) oder Elektronenstrahlen (LUTZMANN 2010) Verwendung. Das Material in der aufgetragenen Pulverschicht wird dadurch aufgeschmolzen und erstarrt nach dem Abkühlen zu einem festen Körper (GEBHARDT 2007). Durch stoffschlüssige Verbindung mit der darunterliegenden Schicht wächst ein massiver Körper (3) heran.

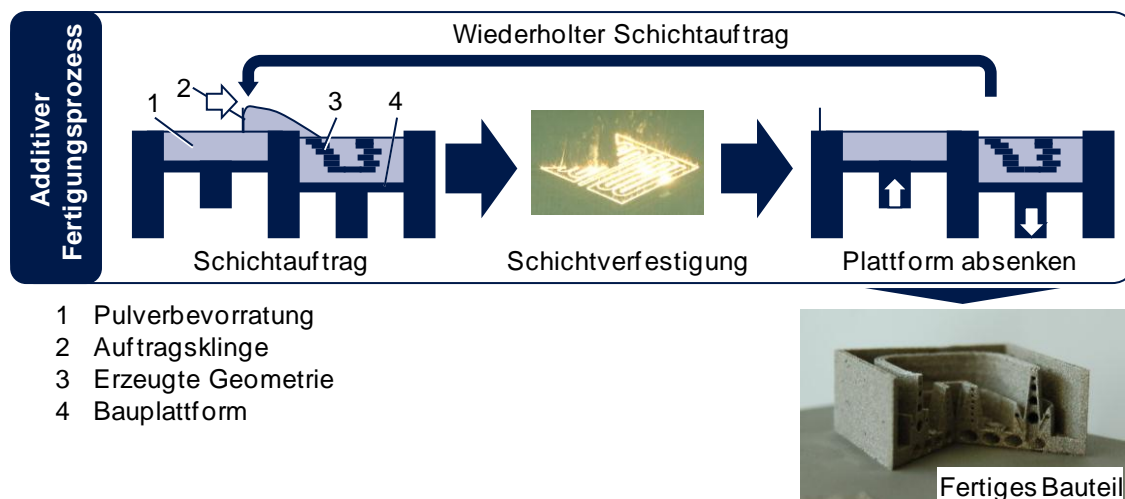


Abbildung 2-5: Prozessablauf beim Strahlschmelzen für monomaterielle Fertigung

Der Schmelzprozess wird über eine Vielzahl an Stell- und Störgrößen beeinflusst. Die dominantesten steuernden Kenngrößen können unter der sog. Energiedichte  $E_V$  (MEINERS 1999) zusammengefasst werden:

$$E_V = \frac{P_L}{h_P \cdot v_L \cdot h_L} \quad (2-1)$$

Die hochenergetische Strahlung trifft mit der Leistung  $P_L$  auf das Pulverbett. Mit zunehmender Belichtungsgeschwindigkeit  $v_L$  vermindert sich die pro Fläche

eingebraachte Energie. Ein flächiges Aufschmelzverhalten des Pulvers wird durch parallel aneinandergelegte Schmelzbahnen mit festgelegtem *Hatch*-Abstand  $h_L$  erreicht. Durch die drei genannten Parameter wird ein bestimmter Energiebetrag in das Pulverbett eingekoppelt, der das Pulver in die schmelzflüssige Phase überführt. Mit zunehmender Schichtstärke  $h_p$  des Pulvermaterials vermindert sich die relative Volumenenergiedichte. Über diese Faktoren hinaus wird der Strahlprozess von weit mehr als 130 Einflussgrößen bestimmt (REHME & EMMELMANN 2005). Während des strahlbasierten Fertigungsprozesses ist bspw. das Fluten der Prozesskammer mit einem Inertgas erforderlich. Die hohen auftretenden Temperaturwerte würden andernfalls zu Oxidationserscheinungen an der Pulver- bzw. der Bauteiloberfläche führen und dadurch die Strahl-Stoff-Wechselwirkung, beispielsweise durch verminderte Strahlungsabsorption, stark beeinflussen.

Das nicht aufgeschmolzene Pulver kann nach dem Entfernen der schweißtechnischen Abfallprodukte unter Zumischung von neuem Pulver zu 100 % in den nachfolgenden Bauprozess eingespeist werden. Dadurch ist der Fertigungsprozess als sehr materialeffizient und ressourcensparend einzuordnen.

### 2.3.5 Folgeprozesse

Je nach gewähltem Schichtbauverfahren sind nachfolgende Prozesse zur Steigerung der Bauteilqualität erforderlich (GEIGER ET AL. 2003). Dies betrifft insbesondere die mechanische Nacharbeit an den funktional einzusetzenden Oberflächen. Additiv aufgebaute Werkstücke weisen verfahrensbedingt hohe Oberflächenrauheiten und den sog. Treppenstufen-Effekt auf, d. h. durch das schichtweise Aufschmelzen der Schichtdaten sind die Übergänge der einzelnen Schichten als Treppenstufen-Effekt am fertigen Bauteil zu erkennen (GEBHARDT 2007). Durch Minimierung der Schichthöhe  $h_p$  kann dieser Effekt vermindert, jedoch nicht vollständig eliminiert werden. Neben der vertikalen Auflösung charakterisiert der Fokusbereich der punktförmigen Energiequelle die horizontale Detaillierungsfähigkeit. Die minimal mögliche Bauteilbreite korreliert dabei mit dem kleinsten Fokusbereich der Strahlquelle. Vorwiegend durch Konduktion breitet sich die absorbierte Energie in das Pulverbett aus und führt zu Pulveranhaftungen in der Peripherie des Schmelzbades. Diese Anhaftungen wiederum zeichnen primär für die Oberflächenrauheit an den seitlichen und nach unten orientierten Flächen verantwortlich (vgl. Abschnitt 6.2.7). Die Struktur der Oberseite des Bauteils wird durch das gewählte *Scan*-Muster geprägt. Je nach geforderter Oberflächengüte ist eine mechanische Nacharbeit erforderlich.

Die mechanische Belastbarkeit des Bauteils ist stark an die darin enthaltene Restporosität gekoppelt. Je geringer diese ist, desto stärker sind interpartikuläre Verbindungen ausgeprägt. Durch das vollständige Überführen des Pulvers in die schmelzflüssige Phase beim Strahlschmelzen kann eine Bauteildichtheit von nahezu 100 % erzielt werden (MEINERS 1999), wodurch die Nachbehandlung überflüssig und der Prozess als einstufiger Prozess bezeichnet wird (VDI 3404 2009). Werden Parameter außerhalb des Prozessfensters gewählt, so wird das Pulver entweder nur oberflächlich angeschmolzen oder es tritt der sog. *Balling*-Effekt auf, welcher sich bei zu hoher Strahlenergie einstellt. Bleibt eine zu hohe Restporosität im Bauteil (sog. Grünling), kann diese durch nachgelagerte Prozesse, wie Vakuumsintern, Heißisostatisches Pressen (HIP) sowie Infiltration, vermindert oder beseitigt und die mechanische Belastbarkeit gesteigert werden. Deshalb werden diese Prozesse als *mehrstufige* bezeichnet (VDI 3404 2009).

Sollen die Oberflächen zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit beschichtet werden, schließen sich diverse Nachbehandlungsprozesse (z. B. Reinigung) an. Diese sind eng an das gewählte Beschichtungsverfahren gekoppelt und sollen an dieser Stelle nicht vertieft werden. Abhängig vom Schichthaftungsmechanismus sind weitere Bearbeitungsprozesse, z. B. mechanisches Strahlen, der Substratfläche erforderlich.

### 2.4 Grundlagen der Schüttguttechnik

Schüttgüter bilden sich aus der Gesamtheit vieler einzelner Partikel. So kann die Eigenschaft eines Schüttgutes durch die Interaktion der einzelnen Teilchen beschrieben werden. Dies ist, je nach Größe des Betrachtungsraumes, sehr aufwendig ( $10^9$  Partikel mit einem Durchmesser von  $10\ \mu\text{m}$  sind in  $1\ \text{cm}^3$  enthalten) (SCHULZE 2009). Jedoch bedarf eine kontinuumsmechanische bzw. makroskopische Betrachtung des Schüttgutes auch einer ausreichend weiträumigen Definition der Systemgrenze, um lokale bzw. mikroskopische Vorgänge an einzelnen Partikelkontakten makroskopisch beschreiben zu können. Bei dieser Betrachtung werden die Kräfte auf den Begrenzungsflächen einzelner Volumenelemente und die daraus folgenden Verformungen bewertet (SCHULZE 2009). Ist die Ausdehnung des Kontinuums im Verhältnis zum Korndurchmesser nicht hinreichend groß, so kann auf eine interpartikuläre Betrachtung (Diskrete-Elemente-Methode) nicht verzichtet werden.



Pulver ist bei den metallbasierenden Schichtbauverfahren die meistverwendete Form des Ausgangsmaterials. Aus diesem Grund gilt es, dieses hinsichtlich bisheriger Charakterisierungsformen und Eigenschaftsausprägungen näher zu betrachten. Ein Blick in die Pulvermetallurgie und die Schüttgutmechanik soll helfen, die bereits gewonnenen Erkenntnisse zur Bewertung von Schüttgütern in die Technologie der Schichtbauverfahren zu übertragen und auf deren Bedürfnisse zu adaptieren. Im Folgenden wird, unter Anwendung der Methoden der Kontinuumsmechanik, die klassische Vorgehensweise in der Schüttgutmechanik erläutert. Auch eine Betrachtung der Einzelpartikel und deren Wirkung im Kontinuum soll durchgeführt werden.

### 2.4.1 Schüttguldichte und Pulvereigenschaften

Im Bereich der additiven Fertigung spielt der *Spannungszustand* des Pulvers (vgl. Abschnitt 2.4.2) eine untergeordnete Rolle, denn durch den flächigen Materialauftrag ist bislang kein detailliertes Wissen über das Pulververhalten notwendig. Der *Spannungszustand* beschreibt dabei die Beanspruchung des Pulvers. Bei Schichtbauverfahren wird angestrebt, dichte Bauteile zu generieren. Die Grundlage dafür bilden ein stetiger, flächiger Pulverauftrag und eine hohe Schüttguldichte  $\rho_b$ . Die Porosität  $\varepsilon$  des Schüttgutelements (siehe Abbildung 2-9) beeinflusst die Schüttdichte und definiert sich aus den Volumina der Zwischenräume  $V_Z$  sowie der Hohlräume  $V_H$ , bezogen auf das Gesamtvolumen  $V$  des Schüttgutelements (vgl. Gleichung 2-2):

$$\varepsilon = \frac{V_Z + V_H}{V} \quad (2-2)$$

Die Schüttguldichte setzt sich aus der Festkörperdichte  $\rho_F$  und der Fluidichte  $\rho_{Fl}$  der Poren zusammen (vgl. Gleichung 2-3). Bei Gasen als Zwischenraummedium kann der fluidabhängige Term in der Regel vernachlässigt werden (SCHULZE 2009).

$$\rho_b = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_F + \varepsilon \cdot \rho_{Fl} \quad (2-3)$$

Mit zunehmender *Verfestigungsspannung*  $\sigma_1$  wird das Schüttgut verdichtet und die Schüttdichte kann stark variieren. Die beeinflussenden Pulvereigenschaften sind sehr vielfältig. Je vollständiger das ermittelte Eigenschaftsbild ist, desto sicherer können technologische Kennwerte abgeleitet und die Eigenschaften des Prozesses bzw. des Endproduktes definiert werden (SCHATT ET AL. 2007). Vielfach ist es erforderlich, das Mischungsverhältnis sowie die Mischungsart für den Schichtbauprozess anzupassen. Die Kombination von Basis- und Legierungsele-

## 2 Grundlagen

ment kann auf vier Grundformen reduziert werden. Es gibt lose gemischte Pulver (a) als kostengünstigste Form, anlegierte (b) und beschichtete Basispulver (c) sowie fertiglegierte Pulver (d) als sog. Verbundwerkstoffe (siehe Abbildung 2-6).

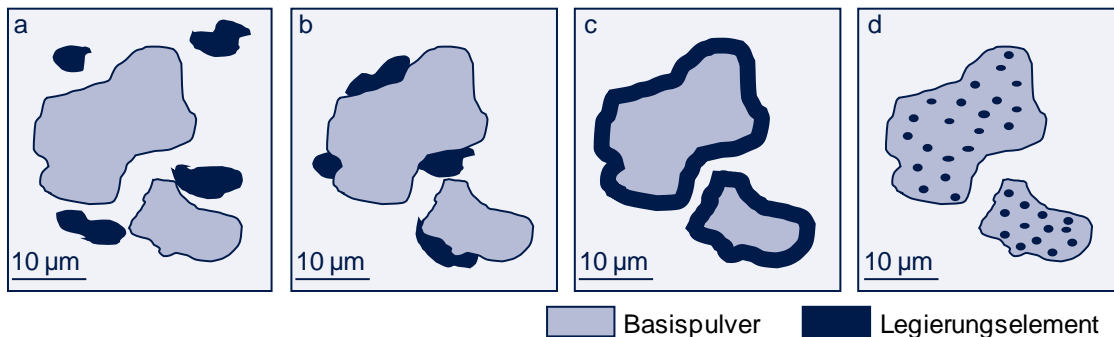


Abbildung 2-6: a) gemischtes Pulver; b) anlegiertes Pulver; c) beschichtetes Pulver; d) fertiglegiertes Pulver (Schatt et al. 2007)

Die Form der Vermischung nimmt erheblichen Einfluss auf die Schüttgutedichte sowie die Prozessstabilität. Je gleichmäßiger die Materialverteilung des Pulvers geartet ist, desto einfacher gestaltet sich der Fertigungsprozess. Die größte Homogenität der Pulvermischung kann durch fertig legierte Pulver sichergestellt werden. Darüber hinaus ist es auch möglich, durch Verbundpulver anstelle zweier lose gemischter Pulver die Restporosität im Bauteil zu reduzieren (KRUTH ET AL. 2005).

Das gewählte Pulververdüungsverfahren ist darüber hinaus für die spätere Pulverform entscheidend. So lassen sich von sphärischen über agglomerierte bis hin zu spratzen Pulverformen unterschiedlichste Korngemetrien erzeugen (KRUTH ET AL. 2004B).

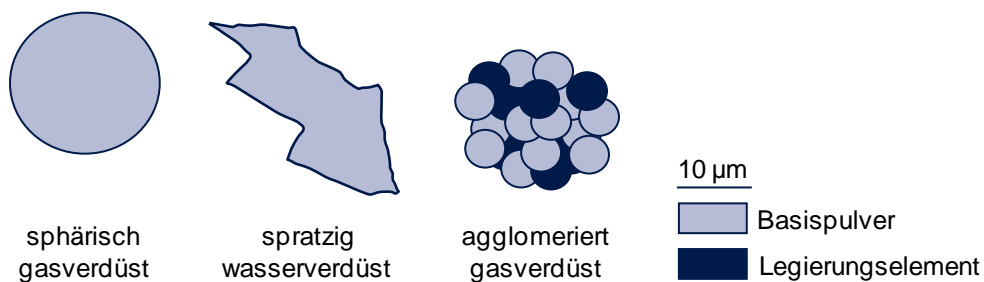


Abbildung 2-7: Auswahl möglicher Partikelformen

Die im additiven Prozess eingesetzte Pulverkorngrößenverteilung liegt üblicherweise zwischen 10 und 60 µm (KRUTH ET AL. 2004B). WALTER betrachtete diese Variation ausführlich in seiner Arbeit über das Sintern (WALTER 1976). Geomet-

rische Kennzahlen wie Teilchengrößenverteilung, spezifische Oberfläche und Teilchenform wurden bewertet. Diese Größen finden sich auch in neueren Arbeiten wieder und wurden durch weitere Eigenschaften sukzessive ergänzt (KLOCKE ET AL. 2003, MEINERS 1999, REHME 2010). Da die Pulvermetallurgie nicht im Kern dieser Arbeit sein soll, wird an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen (GERMAN 1984, SCHATT ET AL. 2007).

Zur Multimaterialverarbeitung ist es erforderlich, den bisherigen Betrachtungsraum im Bereich der Schichtbauverfahren zu erweitern und weitere Bewertungsmethoden des Pulvers, mit dem Fokus auf die Fließfähigkeit, bei den Überlegungen zu berücksichtigen.

### 2.4.2 Kräfte und Spannungen

Der Belastungszustand eines Schüttgutes wird durch angreifende Kräfte sowie die daraus resultierenden Spannungen beschrieben. In Übereinstimmung mit der Nomenklatur der Kontinuumsmechanik werden Normalkräfte  $F_N$  und Schubkräfte  $F_S$  definiert (siehe Abbildung 2-8).

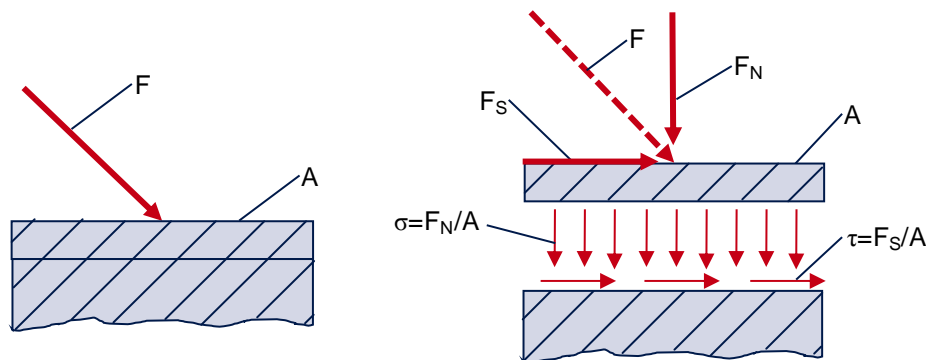


Abbildung 2-8: Angreifende Kraft und Zerlegung in Komponenten und Spannungen (Schulze 2009)

Analog zu den Kräften werden die Normal-  $\sigma$  und die Schubspannungen  $\tau$  als flächenunabhängige Kenngrößen definiert. In der Schüttguttechnik sind dabei Schubspannungen stets an Reibung gekoppelt (SCHULZE 2009). Wird Pulver auf eine horizontale Platte gegeben, so wirkt die Gewichtskraft bzw. eine daraus resultierende Normalspannung. Es zeigt sich keine Relativbewegung zwischen Ebene und Schüttgut. Durch Neigung der Ebene um einen Winkel  $\alpha$  tritt neben der Normal- auch die Schubspannung auf. Je größer der Winkel  $\alpha$ , desto größer ist auch die vorhandene Schubspannung  $\tau$ . Ist der Winkel ausreichend groß, beginnt das Pulver zu fließen. Je größer die im Schüttgut übertragbare

## 2 Grundlagen

---

Schubspannung  $\tau$  ist, desto größer muss der Winkel  $\alpha$  gewählt werden, um das Pulver in den fließenden Zustand zu überführen (SCHULZE 2009). Die Größe der übertragbaren Schubspannung ist oberflächen- und pulverspezifisch. Bei einer ideal glatten Oberfläche der Ebene würde nicht kohäsives Pulver bereits bei  $\alpha > 0^\circ$  zu rutschen beginnen.

### 2.4.3 Spannungskreis

Wird das Volumenelement eines Schüttgutes mit einer extrinsischen Normalspannung  $\sigma_v$  beaufschlagt (siehe Abbildung 2-9), so kann eine Spannung  $\sigma_h$  orthogonal zur Eingangsspannung festgestellt werden. Die Innenwände werden als reibungsfrei angenommen.

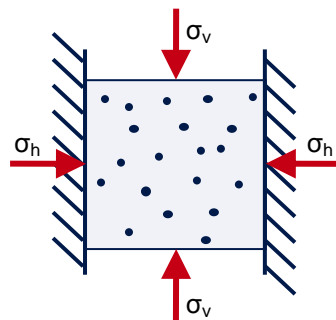


Abbildung 2-9: Schüttgutelement (Schulze 2009)

Das Horizontallastverhältnis  $\lambda$  (vgl. Gleichung 2-4) liegt typischerweise zwischen 0,3 und 0,6 (KWADE ET AL. 1994A, KWADE ET AL. 1994B):

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2-4)$$

Um die Spannungsverhältnisse des Schüttgutelements für beliebige Lagen darstellen zu können, hilft ein einfaches Kräftegleichgewicht. Wird das Volumenelement unter einem beliebigen Winkel geschnitten, so wird folgendes Ergebnis für Normal- und Schubspannungen erhalten (siehe Gleichung 2-5 bzw. 2-6):

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \cdot \cos(2\alpha) \quad (2-5)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \cdot \sin(2\alpha) \quad (2-6)$$

Der Mohrsche Spannungskreis hilft bei der Darstellung der Wertepaare  $(\sigma_\alpha, \tau_\alpha)$  für viele Winkel  $\alpha$  (siehe Abbildung 2-10). Der Mittelpunkt des Kreises wird durch die Gleichung  $\sigma_m = (\sigma_v + \sigma_h)/2$  und  $\tau = 0$  festgelegt. Der Radius ist durch  $\sigma_r = (\sigma_v - \sigma_h)/2$  definiert (GROSS ET AL. 2009).

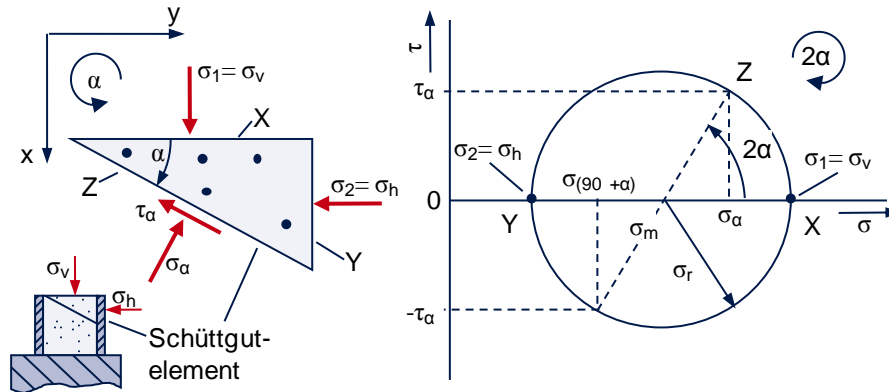


Abbildung 2-10: Kräftegleichgewicht am Schüttgutelement; Mohrscher Spannungskreis (Schulze 2009)

Der Mittelpunkt des Spannungskreises liegt auf der Abszisse. Die wirkenden Normalspannungen werden als Hauptspannungen bezeichnet, wobei die größere Hauptspannung mit  $\sigma_1$  und die kleinere mit  $\sigma_2$  bezeichnet wird. Durch die Angabe der beiden Hauptspannungen ist die Lage des Mohrschen Spannungskreises für den ebenen Spannungszustand eindeutig beschrieben.

Die auf das Schüttgut einwirkende Normalspannung ist die maßgebliche Spannung für den Schüttgutzustand (SCHULZE 2009). Dieser Effekt lässt sich für Versuche mit unterschiedlichen Belastungen nutzen. Die größte Hauptspannung  $\sigma_1$  ist durch die Gewichtskraft ( $F_G = m \cdot g$ ) und die Auflagefläche  $A$  definiert.

Für ein detailliertes Verständnis des Pulvers ist es zielführend, auch die Wechselwirkungen und Eigenschaften der einzelnen Körner zu betrachten.

### 2.4.4 Haftkräfte

Interagieren Pulverkörner, so ist dies auf unterschiedliche Haftkräfte zurückzuführen. Mit zunehmender Dominanz der interpartikulären Kräfte vermindert sich die Fließfähigkeit des Pulvers. Das oben beschriebene Verhalten des Pulverkontinuums kann dadurch auf einzelne Körner reduziert werden. Unter der Annahme, dass feinkörnige, trockene Schüttgüter verwendet werden, spielen vor allem Adhäsionskräfte auf Grund von Van-der-Waals-Wechselwirkungen und elektrostatische Kräfte eine wesentliche Rolle (RUMPF 1990).

Der Wert der Haftkraft wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. So wirken abhängig vom Abstand unterschiedliche Effekte verschieden dominant. Elektrostatische Kräfte spielen bei kleinen Abständen nur eine untergeordnete Rolle.

## 2 Grundlagen

Van-der-Waals-Kräfte hingegen dominieren bei sehr kleinen Abständen und reduzieren sich überproportional stark mit zunehmender Entfernung der interagierenden Partikel (siehe Abbildung 2-11).

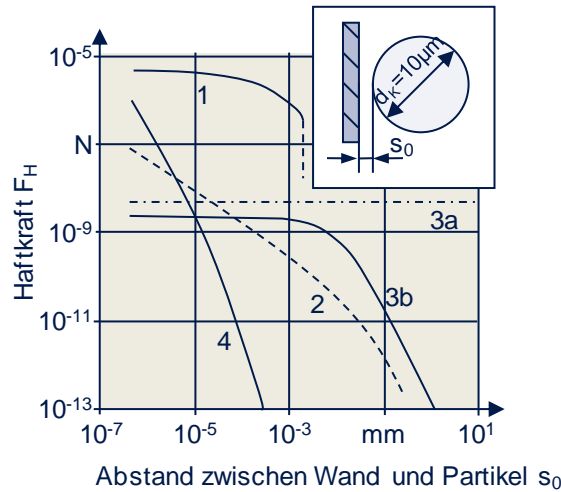


Abbildung 2-11: Bei der Korninteraktion wirkende Haftkräfte: (1) Flüssigkeitsbrücke, (2) elektrostatische Kraft für Leiter, (3) elektrostatische Kraft für Isolatoren für (3a) Kugel-Halbraum und (3b) Kugel-Ladungsfleck, (4) Van-der-Waals-Kräfte (Rumpf 1990)

Darüber hinaus hat die Partikelgröße Einfluss auf die Haftkraft. Bei trockenen Schüttgütern sind Van-der-Waals-Kräfte vorherrschend, elektrostatische Kräfte sind diesen untergeordnet (RUMPF 1990). Die Gewichtskraft ist an das Volumen des Partikels gekoppelt und steigt mit zunehmendem Durchmesser überproportional stark. Die wirkende resultierende Kraft des Partikels ist somit stark von der Partikelgröße abhängig (siehe Abbildung 2-12 links).

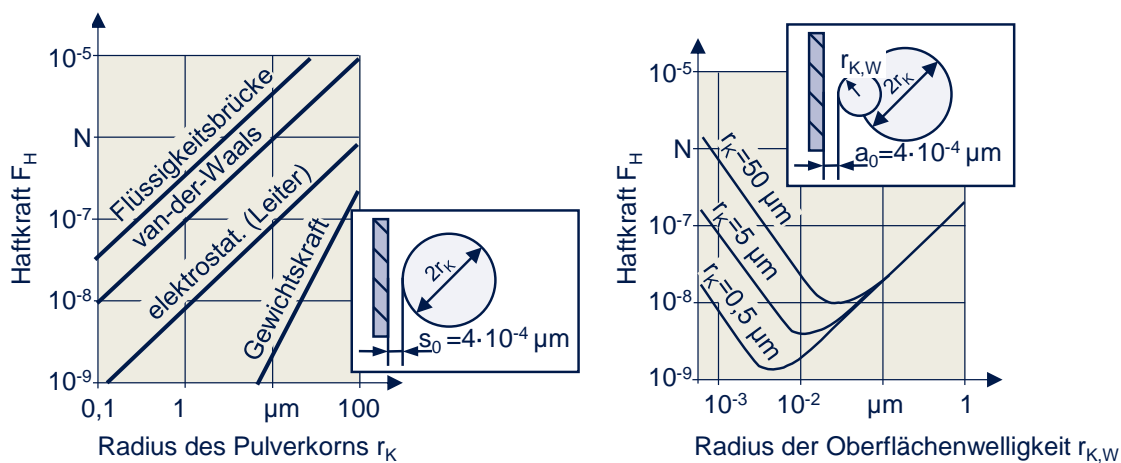


Abbildung 2-12: Einfluss der Partikelgröße und der Oberflächenrauheit der Partikel auf die Haftkraft (Rumpf 1990)

Die Kräfte in oben stehendem Diagramm wurden unter idealisierten Bedingungen ermittelt, d. h. bei ideal glatten Oberflächen. Unter der Berücksichtigung der Oberflächentopologie führt die auftretende Rauheit zu einer Vergrößerung der tatsächlich vorhandenen Distanz zwischen Wand und Kugel. Die Folge eines größeren Abstandes ist eine verminderte Haftkraft.

Van-der-Waals-Kräfte vermindern sich mit zunehmender Rauheit. Die Haftkraft ist dabei proportional zum Partikeldurchmesser (siehe Abbildung 2-12 links). Ab einer spezifischen Rauheit  $r_{K,W}$  gewinnt die Haftkraft zwischen Rauheitsspitze und Wand an Dominanz und kann als eigenständiges Partikel interpretiert werden. Das rechte Diagramm soll oben beschriebenen Zusammenhang verdeutlichen (siehe Abbildung 2-12 rechts).

### 2.4.5 Einfluss der Partikelgröße auf die Korninteraktion

Es lässt sich festhalten, dass Partikel mit zunehmendem Korndurchmesser zu einer besseren Fließfähigkeit neigen, als feine Partikel (SCHULZE 2009). Die dafür maßgeblichen Wechselwirkungskräfte können beispielsweise durch einen Zugversuch ermittelt werden. Dabei wird eine mit Klebstoff beschichtete Platte in eine Pulverprobe gedrückt und nach oben gezogen und die Zugfestigkeit  $\sigma_t$  bestimmt (vgl. Gleichung 2-7):

$$\sigma_t = \frac{F_Z}{A} \quad (2-7)$$

Die Zugkraft  $F_Z$  ist dabei proportional zur Anzahl  $n$  der wirkenden Haftkräfte zwischen den Partikelkontakten  $F_H$ . Wird ein identischer Durchmesser  $d_K$  für alle Partikel vorausgesetzt, so ergibt sich folgender Zusammenhang (vgl. Gleichung 2-8):

$$n \sim \frac{A}{d_K^2} \quad (2-8)$$

Dadurch lässt sich eine umgekehrte Proportionalität zwischen der Zugfestigkeit und dem Partikeldurchmesser ableiten. Dieser Zusammenhang kann qualitativ auch auf die Druckfestigkeit  $\sigma_c$  übertragen werden. Mit steigender Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  erhöht sich die Schüttgutdichte  $\rho_b$  und die Druckfestigkeit  $\sigma_c$ .

Mit sinkendem Korndurchmesser vermindert sich die Fließfähigkeit. Das Zumischen von feinkörnigen Fließhilfsmitteln (SCHULZE 2009), wodurch die Kontaktfläche reduziert und die Fließfähigkeit analog zur Oberflächenrauheit (siehe Abbildung 2-12) gesteigert wird, kann dies ändern.

### 2.5 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wurde ein grundlegendes Verständnis der verwendeten Begrifflichkeiten geschaffen. So wurden die additiven Fertigungsverfahren sowie die Multimaterialverarbeitung definiert. Darüber hinaus wurden das Verfahrensprinzip des Strahlschmelzprozesses sowie wesentliche Erkenntnisse der Schüttguttechnik aufgezeigt. Im nachfolgenden Kapitel gilt es, die bisher geleisteten Forschungsarbeiten im Bereich der additiven Fertigung sowie der Pulvercharakterisierung darzustellen und anschließend den eigenen Beitrag zu motivieren.



# 3 Stand der Forschung und Technik

## 3.1 Vorgehensweise

Um die Multimaterialverarbeitung im Pulverbett zu ermöglichen, ist eine fundierte Kenntnis der Ausgangsstoffe, des Fertigungsprozesses und der Gestaltungsmöglichkeiten des Endproduktes erforderlich. Die Gliederung in diesem Kapitel ist deshalb an der Prozessabfolge der additiven Fertigung orientiert (vgl. Abschnitt 2.3). Beginnend mit der Pulvercharakterisierung (vgl. Abschnitt 3.2), folgen die Pulverbereitstellung (vgl. Abschnitt 3.3) und bereits analysierte Ansätze der Prozessgestaltung (vgl. Abschnitt 3.4). Die Untersuchung neuer Materialien mit den damit verbundenen methodischen Vorgehensweisen wird anschließend betrachtet (vgl. Abschnitt 3.5). Den Abschluss des Kapitels bildet die Ableitung des Handlungsbedarfs zur Erfüllung der Zielsetzung für diese Arbeit (vgl. Abschnitt 3.6).

## 3.2 Pulvercharakterisierung

### 3.2.1 Thematische Hinführung

Die Schüttgutcharakterisierung wurde Ende des 19. Jahrhunderts durch JANSSEN für die Auslegung von Getreidesilos geprägt. Er demonstrierte, dass die Vertikalspannung, im Gegensatz zu Flüssigkeiten, nicht proportional mit der Füllhöhe steigt (JANSSEN 1895). JENIKE beschreibt, aufbauend auf den Grundlagen der Bodenmechanik, das Verhalten von Schüttgütern mit Hilfe des Fließortes und wirkte so maßgeblich auf dem Bereich der Spannungsberechnung bei Silos (JENIKE 1961, JENIKE 1964). Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine Vielzahl an Bewertungsansätzen erforscht. Die Vielseitigkeit des Schüttgutes spiegelt sich auch in der großen Anzahl der erforschten Bewertungsmethoden wider. Die bisherigen Untersuchungen zur Einordnung des Fließverhaltens von Schüttgütern werden im Folgenden vorgestellt.

### 3.2.2 Bewertungsmethoden zur Pulvercharakterisierung

#### 3.2.2.1 Einordnung der Ansätze

Alle Schüttgutbewertungsansätze vereint der Grundgedanke, das Materialverhalten vorhersagen zu können. Dabei muss zwischen anwendungsfallsspezifischen und allgemeingültigen Betrachtungen unterschieden werden. In der Fördertechnik sind die Unstetigkeiten kinetischer und geometrischer Randbedingungen des Transportvorganges als kritischer Abschnitt einzustufen. Deshalb verwundert es nicht, dass sich eine Vielzahl der Untersuchungen mit der Auslegung von Ausströmvorgängen bei Silos befasst. Für die Ermittlung der Pulvereigenschaften wurden unterschiedliche experimentelle und simulative Methoden ausgewählt. Für eine realitätsnahe Beschreibung des Schüttgutverhaltens kommt den sog. Stoffmodellen, die im folgenden Abschnitt detailliert werden, eine zentrale Bedeutung zu.

#### 3.2.2.2 Stoffmodelle zur Beschreibung von Schüttgütern

Ein Stoffmodell ist in der Lage, die Zustände des Schüttgutes flexibel und allgemeingültig darzustellen. Dies umfasst sowohl statische (z. B. während der Lagerung) als auch dynamische Zustände (z. B. Entleerung). Darüber hinaus ist es von Vorteil, unterschiedliche Schüttgüter abbilden zu können (ROMBACH & NEUMANN 2003). Das Stoffmodell stellt somit eine physikalische Theorie dar, mit welcher bezweckt werden soll, das mechanische Verhalten eines bestimmten Stoffes mathematisch zu beschreiben (KOLYMBAS 1988). Einen analytischen Ansatz, das sog. hypoplastische Stoffmodell, zur Beschreibung granularer Güter wählten HAFF und HUI (HAFF 1983, HUI ET AL. 1984). Ihr Modell bildet das kontinuumsmechanische Verhalten trockener, kohäsionsloser Schüttgüter durch kinetische Ansätze ab. Die Fluktuation granularer Schüttgüter wird mittels Viskosität, Dissipationskoeffizienten der kinetischen Energie und Druck beschrieben. FÜTTERER griff die konstitutiven Gleichungen zur Darstellung des schnellen Fließens von trockenen, kohäsionslosen Schüttgutteilchen auf (FÜTTERER 1991).

Ein weiteres Modell, das sog. hypoelastische Stoffmodell, kann in einfacher Weise zur Beschreibung körniger Stoffe herangezogen werden (KOLYMBAS 1988). Bei diesem Ansatz werden Kornkenngrößen wie Rundheit, Rauheit, Härte oder Größenverteilung abstrahiert und durch eine einzige Variable, die Porenzahl  $e_p$  ( $V_{\text{Poren}}/V_{\text{Körner}}$ ) berücksichtigt. Um das Materialverhalten darzustellen, wird

eine mitgedrehte Spannungsrate als Funktion der Spannung und der Deformationsgeschwindigkeit verwendet. Zur Modellierung von feinem Kalkstein ergänzte FEISE (FEISE 1996) das Stoffmodell von KOLYMBAS (KOLYMBAS 1991) um weitere Größen. Dadurch ist es möglich, die Zeitabhängigkeit kohäsiver Substanzen (z. B. Spannungszustand) zu beschreiben.

### 3.2.2.3 Simulative Ansätze

Mithilfe einer simulativen Vorgehensweise können empirische Datenerhebungen teilweise substituiert werden. Durch die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) untersuchte von GODA den Einfüll- und den Ausflussvorgang von Schüttgut in ein bzw. aus einem Silo. Besonderes Augenmerk galt dabei den auftretenden Kräften und Drücken in den Wänden (GODA & EBERT 2005). Die betrachteten Trichtergeometrien wurden dabei variiert sowie das verwendete Material als kohäsionslos und mit einheitlichem Durchmesser modelliert. LANGSTON untersuchte die auftretenden Wandspannungen in Abhängigkeit von der Ausflussrate im Zwei- (Scheiben) und im Dreidimensionalen (Kugeln) (LANGSTON ET AL. 1995). Bei der Simulation wurden auch die Korninteraktionen sowie eine Pulverkorngrößenverteilung berücksichtigt. Es zeigte sich, dass die beim Ausflussvorgang auftretenden Spannungsspitzen an den Trichterwänden für den Abbruch des Massenstroms verantwortlich sind. Mittels DEM können auch Zweiphasensysteme, bestehend aus Luft und dem Granulat, dargestellt werden (LANGSTON ET AL. 1996). Für den als konstant angenommenen Luftstrom wurden die Vereinfachungen des idealen Gases getroffen und die Interaktionen zwischen Wand und Partikel erfasst. Die Ausflussrate wurde in Kombination mit dem Luftmassenstrom, sowohl mit unterstützender als auch mit hemmender Wirkung, untersucht. Es wurde verdeutlicht, dass die Wandspannung durch das Transportmedium Luft ansteigt und dadurch die Ausflussrate bei kleinen Austrittsöffnungen reduziert. Unter Berücksichtigung von interpartikulären Reibungskoeffizienten erforschte LI die Präzision des Granulatausströmvorganges (LI ET AL. 2009). Mittels einer farblichen Trennung der Kern- und Randbereiche des Trichters konnten die Modelle experimentell validiert werden.

Neben der DEM gibt es auch Ansätze der Finiten-Elemente-Methode (FEM), die das Schüttgut als Kontinuum simulieren. KARLSSON stellte mittels FEM den transienten Fluss von kohäsionslosen Pulvern in Silos dar (KARLSSON ET AL. 1998). Durch die Annahme fluider Eigenschaften des Pulvers ist es mit dem aufgebauten Modell möglich, Belastungszustände initial vorzugeben. Das Simulationsmodell dient zur Bewertung der transienten Spannungszustände unter

Variation der Silogeometrien. Auch HÄUBLER und GLADEN nutzten die FEM, um das Ausfließen von Schüttgütern aus Silos zu modellieren. Dabei wurden zentrische (HÄUBLER 1984) und exzentrische (GLADEN 1985) Entleerungsvorgänge genauer analysiert.

Neben den Untersuchungen der Spannungszustände in Trichtern hilft die Simulation auch bei der Abbildung der experimentellen Aufbauten. TYKHONIUK modellierte eine Jenike-Scherzelle (vgl. Abbildung 5-2, S. 73) unter Einsatz der DEM (TYKHONIUK ET AL. 2003). Als Pulver verwendete er sehr feines  $\text{TiO}_2$ -Pulver ( $d_{K50} \approx 1 \mu\text{m}$ ). Die Scherzone wurde hinsichtlich der Kraftverteilung und der auftretenden Geschwindigkeitsvektoren bewertet. Zur Validierung der Simulationsmodelle wurden empirisch ermittelte Werte herangezogen. Diese lassen sich über standardisierte Bewertungsmethoden erzielen, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

#### 3.2.2.4 Experimentelle Bewertungsmethoden

Zur Bestimmung der Fließfähigkeit erstellte SCHULZE Kriterien, anhand welcher Messverfahren mit dem Fokus auf die Fließfähigkeitsbestimmung ausgewählt werden können (SCHULZE 1995). Beispielhaft seien hier der Trichter (DIN ISO 4324 1983, ASTM B213-97 1998), der Böschungswinkel (DIN ISO 4324 1983), der einachsige Druckversuch und die Schergeräte angeführt. Für eine detaillierte Beschreibung der vorwiegend industriell eingesetzten Messverfahren sei an dieser Stelle auf SCHULZES Buch „Pulver und Schüttgüter“ (SCHULZE 2009) verwiesen. Schergeräte repräsentieren den Standard in der Schüttguttechnik (SCHULZE 2009). SCHWEDES ergänzt diese Liste durch weitere in der Wissenschaft verbreitete Messsysteme (SCHWEDES 2003). Grundgedanke der Messsysteme ist es, den Spannungszustand bei unterschiedlichen Belastungszuständen zu ermitteln. Die Fließfähigkeit, als wichtigste verfahrenstechnische Kenngröße des Schüttgutes, verhält sich dabei proportional zum vorliegenden Zusammenhalt des Pulversystems. Schubspannungswerte, die durch Scherversuche verschiedener Labore ermittelt wurden, waren mit Abweichungen in der Größenordnung von bis zu  $\pm 12\%$  versehen (AKERS 1992, VERLINDEN 2000). Vergleichsmessungen von unterschiedlichen Geräten sind somit stets als kritisch anzusehen, da identische Randbedingungen nur sehr eingeschränkt gewährleistet werden können. MARKEFKA und STECKEL stellten zwei unterschiedliche Verfahren einander gegenüber (MARKEFKA & STECKEL 2005). Dabei wurde das Ringschergerät mit anderen Messverfahren (z. B. Lawinenbildung, Rührer, Verdichtbarkeit) auf Grundlage von Pulvern mit abgestufter Fraktionierung verglichen. Es konnte durch das

Schergerät eine stetige Abnahme der Fließfähigkeit mit kleiner werdenden Partikeldurchmessern ermittelt werden. BELL veranschaulichte, dass einfache Messverfahren nicht immer die gleiche Rangfolge der Fließfähigkeitswerte der verschiedenen Pulver ermittelten (BELL ET AL. 1995). Durch die Vielzahl der wissenschaftlich abgesicherten Scherversuche ist diese Methode in der Industrie und Forschung als standardisiert anzusehen (SCHULZE 2009).

### 3.2.3 Einordnung des Fließverhaltens von Schüttgütern

Die im vorhergehenden Abschnitt aufgeführten simulativen und experimentellen Methoden offenbaren, dass es prinzipiell zwei Vorgehensweisen zur Bestimmung der Fließfähigkeit gibt. Einerseits lassen sich die auftretenden Flussphänomene, ausgehend von den Eigenschaften der Einzelkörner und den Partikelinteraktionen, erklären. Andererseits wird das Pulver per se als Kontinuum mit intrinsischen Spannungszuständen betrachtet. Werden die einzelnen Körner berücksichtigt, so wird dies als mikroskopische Betrachtungsweise bezeichnet. Werden die Eigenschaften einzelner Körner vernachlässigt, so wird dies als makroskopisches Vorgehen definiert. Die kontinuumsmechanische Betrachtungsweise setzt dabei aber voraus, dass die Behälterabmessungen sehr viel größer sind als die der einzelnen Schüttgutteilchen (KELLER 1988). Die Rahmenbedingungen und der Detaillierungsgrad der zu untersuchenden Problemstellung geben die zu wählende Vorgehensweise vor.

Die Bewertung der Fließfähigkeit ist für viele Branchen wichtig. So wurden Schüttgüter beispielsweise im Bereich der Lebensmitteltechnik (KUSCHEL 1998), der Pharmazie (KRETZLER 2002), der Futtertechnik (SCHURICHT 2004) oder der Produktionstechnik (WITTMAYER 2003) untersucht. Das Ziel aller Bemühungen ist ein optimaler Materialfluss. Das Fließverhalten kann sowohl durch Veränderungen der Pulvereigenschaften als auch durch Variation der Trichtergestaltung beeinflusst werden.

Die Trichtergestaltung sollte derart sein, dass Fließprofile massefluss- statt kernflussorientiert sind (WITTMAYER 2003). Dies kann durch Einbauten zur gezielten Steuerung des Schüttgutaustrags ermöglicht werden. SCHURICHT beobachtete, dass durch Einbauten die Spannungs- und die Geschwindigkeitsverteilungen homogenisiert und die Fließfähigkeit verbessert werden (SCHURICHT 2004). Beginnt das Entleeren, so treten i. A. zu Beginn hohe Spannungsspitzen auf. Bei Trichtern mit vertikalen Wänden bewegt sich das Pulver wie ein starrer Festkörper mit geringen elastischen Verformungen. Bei Silos mit zentrischen Trichtern

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

wird das Fließprofil in der Nähe des Ausflusses durch große vertikale Geschwindigkeitsgradienten ergänzt (HÄUBLER 1984). Dies führt zu einer starken Auflockerung im Schüttgut. Bei exzentrischer Anordnung der Öffnung sind unsymmetrische Druckverteilungen erkennbar, aus denen hohe horizontale Geschwindigkeitskomponenten resultieren. Je größer die Exzentrizität und der Austrittsdurchmesser sind, desto weiter oben im Trichter beginnt die horizontale Geschwindigkeit zu wirken (GLADEN 1985). Die Geschwindigkeits- und die Spannungsverteilung zeichnen maßgeblich für das Fließverhalten des Schüttgutes verantwortlich. STADLER untersuchte diesbezüglich auch den Öffnungsdurchmesser des Trichters genauer und stellte fest, dass ein kritischer materialabhängiger Auslaufdurchmesser existiert (STADLER 1986). Ist der minimal mögliche Düsendurchmesser erreicht, so wird angenommen, dass sich eine dünne, bogenförmige Brücke der Pulverkörner im Trichter ausbildet. Bricht diese Brücke, führt dies zu pulsierenden Auslaufmassenströmen (SCHWEDES 1968). Das Integrieren von Einbauten (z. B. Rührer) in den Trichter reduziert die Spannung und unterstützt bei der Verbesserung des Fließprofils (SCHURICHT 2004).

Die zweite Möglichkeit zur Verbesserung der Fließfähigkeit ist durch Veränderungen in der Pulverzusammensetzung gegeben. Feuchtigkeit im Schüttgut erhöht die Tendenz der Verklumpung bzw. der Brückenbildung. Durch Feuchtigkeitsentzug kann der Massestrom stabilisiert werden (KUSCHEL 1998). Je mehr Flüssigkeit in diesem Dreiphasengemisch, bestehend aus Festkörper, Gaseinschlüssen und Flüssigkeit, enthalten ist, desto höher ist die Tendenz der Brückenbildung. Bei feuchten Schüttgütern bildet sogar die Flüssigkeit das tragende Gerüst dieser Phasenkonstellation (STADLER 1986). Die Fließfähigkeit wird überdies auch durch den Korndurchmesser bzw. die Dispersität des Schüttgutes beeinflusst. Hochdisperses, d. h. sehr feinkörniges, Pulver neigt einerseits zur Agglomeration und daher zu verminderter Fließfähigkeit (WITTMAYER 2003). Werden feinste Partikel andererseits gezielt agglomeriert, so verbessern sich die Fließeigenschaften dieser Pulver (KUSCHEL 1998). Diese Steigerung der Fließfähigkeit hat auch zur Folge, dass das Schüttgut durch geringere Öffnungsdurchmesser fließen kann.

Soll Pulver transportiert werden, ist dies auch unter Verwendung von Fluiden möglich. Durch Gase (MEDICOAT 2001) oder Flüssigkeiten (MÜLLER 1961) fluidisiertes Schüttgut verhält sich wie eine Newtonsche Flüssigkeit (SCHWEDES 1968). Unter Verwendung von Rieselhilfsmitteln wird die Kontaktfläche zwischen den Partikeln reduziert und die Fließfähigkeit verbessert (KUSCHEL 1998). Ein fluidisierter Zustand des Schüttgutes kann überdies auch durch hochfrequen-

te Vibrationen erzielt werden (AL-JAMAL ET AL. 2008, MEINERS & WISSENBACH 2007, YANG & EVANS 2010). Die zunehmende Bewegung führt zu einem metastabilen Zustand.

Die durchgeführten Untersuchungen verdeutlichen, dass das Schüttgut und die Düse stets in Kombination zu betrachten sind. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie die erfolgreich etablierten Messverfahren (z. B. Ringschergerät) müssen beim Aufbau eines Multimaterialverarbeitungsprozesses berücksichtigt werden.

## **3.3 Auftragsmechanismen zur Pulverbereitstellung**

### **3.3.1 Einordnung der Auftragsmechanismen**

Auftragsmechanismen nehmen eine entscheidende Rolle in der Prozessabfolge ein. Dies trifft nicht nur für den in dieser Arbeit zu Grunde gelegten pulverbettbasierten Bauprozess zu, sondern auch für Systeme, die ohne Pulverbett arbeiten. Es werden somit Mechanismen für das Pulverhandling aus beiden Bereichen der additiven Fertigung vorgestellt. Der Pulverauftrag im pulverbettbasierten Bereich beruht auf einem sukzessiven, schichtweisen Vorgehen. Dies kann durch verschiedene Prinzipien erfolgen, welche im Abschnitt 3.3.2 erläutert werden.

### **3.3.2 Pulverbettbasierte Konzepte**

#### **3.3.2.1 Klassisches Rakelprinzip**

Die Rakel dient dem flächigen Pulverauftrag und kann verschieden ausgeprägt sein. Sie kann ein statisches Element, bestehend aus einer steifen Klinge aus Keramik bzw. Stahl, einer elastischen Gummilippe oder eines Bürstenschiebers sein (ZHANG 2004). Zudem können auch dynamische Systeme zum Pulverauftrag und zur Pulververdichtung verwendet werden, beispielsweise eine Walze. Dabei ist unerheblich, ob sich die Pulverbevorratung oberhalb (HUFTLESS 2005) oder unterhalb (MEINERS 1999, SIGL 2008) der Arbeitsebene befindet (siehe Abbildung 3-1). Das Pulver wird aus der Bevorratung der Rakel zur Verfügung gestellt. Diese übernimmt anschließend die Aufgabe der Partikelverteilung und der Nivellierung. Die Dosierung und der Schichtauftrag der Pulvermenge sind in jedem Fall für die Bauteilqualität und die Prozesssicherheit entscheidend.

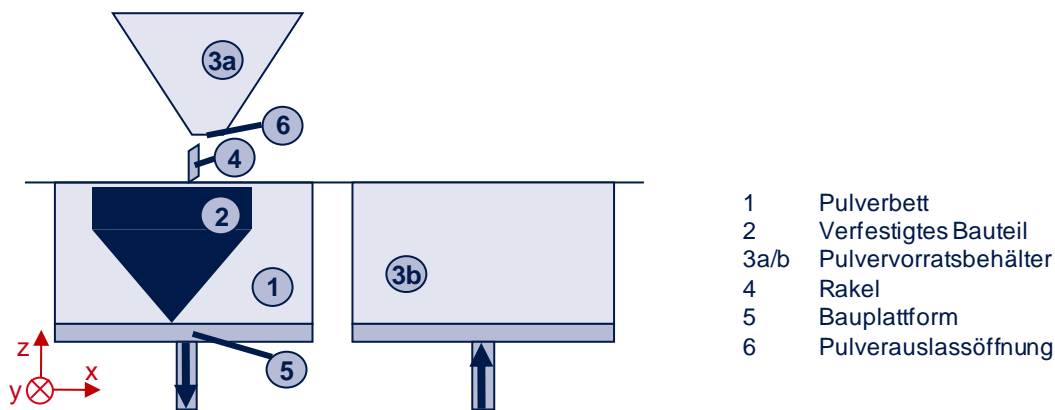


Abbildung 3-1: Rakelmechanismus für den flächigen Pulverauftrag

Das Pulver muss gleichmäßig auf der Bauplattform verteilt werden. Laut ZHANG führen hohe Auftragsgeschwindigkeiten zu einer Wellenstruktur und zu niedrigen Schüttgutdichten (ZHANG 2004). Dabei sind eine über die Fläche konstante Höhe sowie eine hohe Auftragsdichte des Schüttgutes für die Prozessstabilität entscheidend. Ungleichmäßiger Pulverauftrag führt zu unstetigem Bauteilwachstum und hat eine verminderte Bauteilqualität zur Folge.

#### 3.3.2.2 Gezielter Pulverauftrag mittels Düsenprinzip

Neben flächigen Auftragsprinzipien lassen sich Düsen für den Pulverauftrag verwenden. Ein Versuchsaufbau mehrerer Düsen in Kombination mit einer Dreiachskinematik wurde an der Universität Manchester realisiert (AL-JAMAL ET AL. 2008). Dabei wurde ein Düsendurchmesser  $d_D$  von 0,4 mm verwendet. Der mittlere Pulverdiameter  $d_{K50}$  lag zwischen 31,8 und 37,4  $\mu\text{m}$ . Der Pulverfluss wurde mittels einer piezoelektrisch angetriebenen Vibrationseinheit ermöglicht. Durch eine Schwingbewegung wird die interpartikuläre Reibung vermindert und das Pulver beginnt zu fließen. Ein ähnliches Prinzip liegt dem „dry powder jet printer“ zu Grunde (YANG & EVANS 2010). Dieser macht sich die Kapillarkräfte kleiner Düsendurchmesser (280  $\mu\text{m}$ ) zunutze. Mittels eines Ultraschallgenerators werden diese herabgesetzt und das Pulver wird so zum Fließen gebracht. Es kann ein Pulveraustrag von weniger als 0,05 mg je Dosierung erzielt werden.

Ein Mikrotrichter für die Pulverdosierung wurde an der Universität von Michigan erforscht (DAS & SANTOSA 2001). Das Pulver muss nach bestimmten Kriterien klassifiziert werden, um die Funktionsfähigkeit der Mikrotrichter sicherzustellen. Gegenstand der Untersuchung war die Beeinflussung des Pulverflusses mit und ohne Transportmedium (z. B. Luft) bei Düsendurchmessern von 0,5,



### 3.3 Auftragsmechanismen zur Pulverbereitstellung

0,75 und 1 mm (DAS & SANTOSA 2001). Das System wurde mittels 100  $\mu\text{m}$  großer Glaskugeln getestet.

Neben den Untersuchungen zur Gestaltung der Auftragsdüsen ist die Einbindung in den Prozessablauf wichtig. ROCK und GILMAN entwickelten ein Auftragssystem, das zwei Materialien über eine Zweiachskinematik aufträgt. Dazu wird das Arbeitsfeld gerastert und das Pulver an der berechneten Rasterung abgelassen (ROCK & GILMAN 1995). Um die Leerräume, die nicht mit dem Bauteilmaterial versehen werden, zu füllen, wird eine zweite Düse mit *Support*-Material gefüllt. Dieses hat nur die Funktion, das Bauteil zu unterstützen und die Hohlräume zu füllen. Soll der Pulverauftrag nur mit einer Einachskinematik realisiert werden, so ist die zweite Achse durch parallel angeordnete Düsen zu ersetzen (siehe Abbildung 3-2). Durch Parallelschaltung mehrerer Düsen kann die Pulverauftragszeit reduziert werden (ZHAO ET AL. 2001).

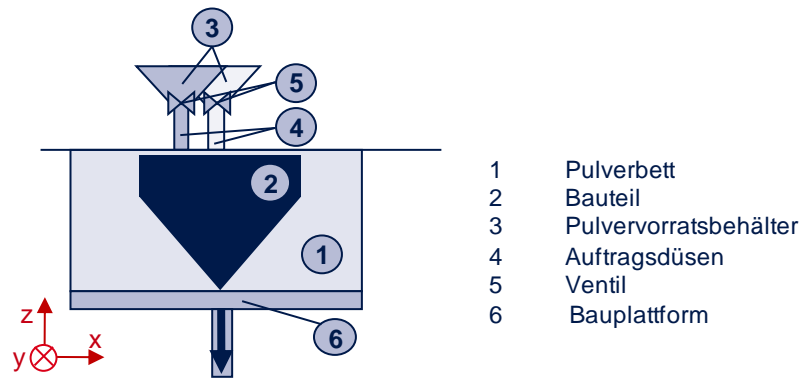


Abbildung 3-2: Konzeptionelles Auftragsprinzip für die Multimaterialverarbeitung (vgl. Meiners & Wissenbach 2007)

Durch weiteres Parallelisieren der einzelnen Düsenreihen kann ein flächiges Auftragssystem aufgebaut werden, bei dem jede Düse einzeln und gezielt angesteuert werden kann. Die Verarbeitung mehrerer Materialien kann durch Hintereinanderschalten der Düsenreihen erzielt werden (MEINERS & WISSENBACH 2007).

#### 3.3.2.3 Pulverauftrag mittels Elektrofotografie

Die Elektrofotografie ist neben der Rakel und der Düse ein weiteres Konzept, das für den Pulverauftrag genutzt werden kann. Dabei wird das physikalische Prinzip der elektrostatischen Aufladung verwendet, um Pulver an einem Element (z. B. Walze, Platte) anhaften zu lassen und gezielt in die Bauebene abzugeben. Im

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

Rahmen des Forschungsvorhabens „Metal Printing Process“ (MPP) wurde der Einsatz elektrofotografischer Auftragssysteme im Schichtbauverfahren untersucht (VAN DER EIJK ET AL. 2004). Es kommt hierbei eine Platte mit den Abmaßen des Bauraumes zum Einsatz. Diese kann mehrmals hintereinander belichtet werden. Die eingestellten Belichtungsparameter sind dabei materialabhängig (BAKKELUND 1997). Nach jedem Belichtungsvorgang wird über einen Pulvervorrat gefahren und die entsprechenden Materialpartikel werden an den ladungstragenden Stellen aufgenommen. Ist die Fläche der Platte vollständig mit Pulver bedeckt, fährt diese über den Bauraum und presst die Pulverschicht auf die bereits verfestigten Ebenen. Dabei wird ein Grünling erzeugt, der über nachgelagerte Prozesse seine endgültige Festigkeit erreicht, wie dies auch beim IMLS der Fall ist (SEEFRIED 2005).

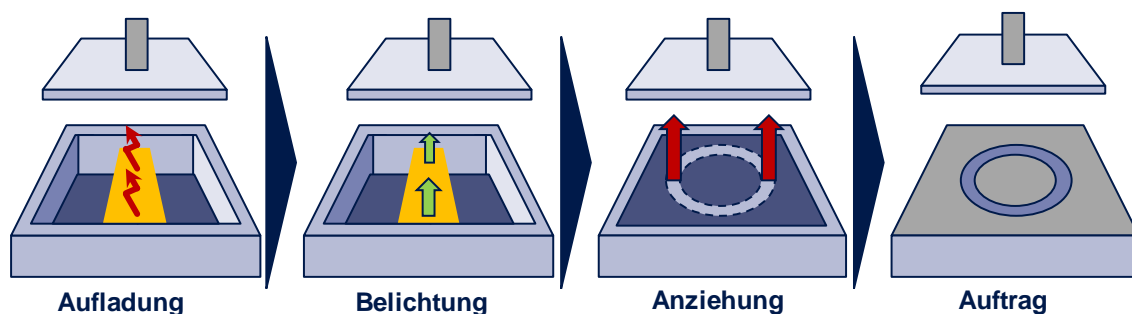


Abbildung 3-3: Prozessabfolge für den elektrostatischen Pulverauftrag (vgl. van der Eijk et al. 2004)

Neben diesem funktionsfähigen Forschungsprototyp existiert eine Vielzahl an Patenten. Stellvertretend seien hier einige genannt, die einen Prozess bzw. eine Anlage unter Verwendung von Elektrofotografie beschreiben: GREENDA 1994, KARLSEN & BAKKELUND 2002, KUMAR 1998, LIU & YANG 2001, SCHMIDLIN 1998.

#### 3.3.2.4 Weitere Auftragsprinzipien

Darüber hinaus gibt es weitere Prinzipien zur Dosierung. Die Vereinzelung von Kugeln mit einem Durchmesser von 1,5 mm kann über ein Vereinzelungsrädchen geschehen. Über eine magnetisch angesteuerte Engstelle werden die Kugeln durch Reibung in der Düse fixiert. Befindet sich die Einheit über der gewünschten Position, so wird die Fixierung gelöst und eine Kugel abgegeben (HILLER & LIPSON 2009A). Dieser Mechanismus funktioniert sehr genau, bedarf aber eines einheitlichen und einzeln handhabbaren Schüttgutdurchmessers.

Das Drucken von Metallen in aerosolen Gemischen ermöglicht sehr dünne Bahnen (minimale Bahnbreite von 80  $\mu\text{m}$ ). Dabei kann in Abhängigkeit von der Tinte die Linienbreite bis zu 1/10 der Düsenöffnung betragen. Voraussetzung dafür ist eine sehr niedrige Viskosität des Gemisches und feine Festkörperpartikel (HÖRTEIS ET AL. 2007).

Um Keramik zu drucken, wird diese in einen gewöhnlichen piezoelektrisch gesteuerten Tintenstrahl Druckkopf gegeben. Das reibungslose Generieren dreidimensionaler Körper erfordert allerdings akribische Vorarbeiten. Das Pulver muss mehrfach zerkleinert und gesiebt werden, denn ansonsten kann es zur Verstopfung der 60- $\mu\text{m}$ -Düsenaustrittsöffnung kommen (BLAZDELL & EVANS 1999).

Alle aufgeführten Prinzipien wurden bislang noch nicht im Kontext der additiven Prozesse erforscht, sodass dies der Beitrag der vorliegenden Arbeit sein soll.

#### 3.3.3 Pulverbettlose Fertigung

Pulverbettlose Systeme (z. B. Laserauftragschweißen) benötigen das Ausgangsmaterial im Fokuspunkt des Strahlmediums (SCHMIDT ET AL. 2010). Deshalb werden die Partikel kontinuierlich zugeführt und fortwährend durch die hochenergetische Strahlung aufgeschmolzen, im Gegensatz zu pulverbettbasierten Systemen, bei denen der Auftrags- und der Aufschmelzprozess seriell und autark ablaufen. Die lokal begrenzten Pulverauftragsmechanismen sollen in diesem Abschnitt näher gebracht werden.

Die Firma Medicoat AG entwickelte einen Mechanismus zur Dosierung von Pulver (MEDICOAT 2001). Dabei werden die Partikel auf einen Drehteller gegeben und die Förderrate wird in Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit der Pulvertransportplatte gesteuert. Der Drehmechanismus erfordert ein Trägergas zur kontinuierlichen Förderung des Pulvers.

Das Fluidisieren des Schüttgutes verbessert die Fließeigenschaften, vermindert jedoch die Präzision, mit der das Pulver platziert wird. Das System ist für eine gleichmäßige Pulverförderung ausgelegt. Es können sowohl ein als auch mehrere Materialien verarbeitet werden. Durch die parallele Verwendung mehrerer Pulverförderer kann die Werkstoffzusammensetzung während des Prozesses variiert werden, wodurch auch sog. gradierte Multimaterialstrukturen erzeugt werden können (THEILER 2003). Das Pulver wird vom Pulverförderer über eine Leitung zur Pulverdüse transportiert. Diese wiederum kann dabei konzentrisch oder seitlich zum Laserstrahl angeordnet werden.

### 3.4 Prozessgestaltung

#### 3.4.1 Prozessablauf

##### 3.4.1.1 Thematische Einordnung

Die vorgestellten Auftragsmechanismen (vgl. Abschnitt 3.3) sind in einen Prozessablauf eingebettet und folgen einem festen Ablaufschema (vgl. Abschnitt 2.3). Um den Strahlschmelzprozess zu optimieren, wurden bereits verschiedene Einflussmöglichkeiten betrachtet, die im Folgenden dargestellt werden.

Durch die Variation der sequentiell ablaufenden Teilprozesse lässt sich der Gesamtprozess verändern. Dies trifft sowohl für die Bauprozessvorbereitung (z. B. Datenqualität) als auch für den eigentlichen Fertigungsprozess zu.

##### 3.4.1.2 Vorbereitung des Bauprozesses

Die gemeinsame Grundlage der additiven Fertigungsprozesse ist das virtuelle, volumenbasierte Produktmodell (GIBSON ET AL. 2009, ZÄH 2006). Neue Entwicklungen beim Datenformat ermöglichen weitere Inhalte. So enthält *STL 2.0* auch die Möglichkeit, mehrere Materialien zu speichern (HILLER & LIPSON 2009B). Das neue Format berücksichtigt somit Anforderungen, die sich aus den Potentialen der Anlagentechnik ergeben, und trägt so zu einem flexibleren Prozessablauf bei. Für die Akzeptanz und Anwendung der Multimaterialverarbeitung sind Forschungsarbeiten auf den Gebieten der Prozessvorbereitung und der Bauteilmodellierung unerlässlich.

##### 3.4.1.3 Ablauf des Bauprozesses

Für den prinzipiellen Prozessablauf beim Strahlschmelzen ist der Wechsel zwischen Pulverauftrag und Aufschmelzen des Materials in jeder Schicht notwendig (ZÄH 2006). Die Qualität des Prozesses kann jedoch über weitere Zwischenschritte verbessert werden. So können mehrfache Beschichtungs- und Aufschmelzvorgänge bei gleichbleibender Bauteilhöhe eine Zunahme der Pulverauftragshöhe verhindern. Weiterhin resultieren daraus eine hohe Qualität der Pulverschicht und eine hohe Schüttgutdichte. Dadurch kann der Zusammenhalt der Schichten verbessert und eine mögliche Desintegration vermieden werden (KELLER ET AL. 1993). KÜSTERS und YASA haben in Untersuchungen festgestellt, dass

die Bauteileigenschaften gezielt durch mehrfaches Aufschmelzen und Erstarren der Schicht beeinflusst werden können (KÜSTERS ET AL. 2009, YASA & KRUTH 2009). Darüber hinaus soll eine verbesserte Oberflächenqualität durch ein erneutes Aufschmelzen und Verfestigen der Schichten erzeugt werden können (YASA & KRUTH 2009).

Zur Verfestigung von Suspensionen durch Strahlschmelzen ist ein zusätzlicher Prozessschritt zur Trocknung der aufgetragenen Schicht erforderlich. Trifft das Strahlmedium auf die Suspension, so wird die Flüssigkeit verdampft, wodurch der Feuchtigkeitsgehalt in der vorliegenden Atmosphäre ansteigt. Dies führt zu einer Abschattung des Laserstrahls und vermindert die maximal absorbierbare Energie während des Aufschmelzvorganges (YEN ET AL. 2005). Folglich ist zwischen dem Auftragsprozess und der finalen Verfestigung der Flüssigkeits-Festkörper-Mischung ein Trocknungsprozess einzufügen (siehe Abbildung 3-4). Dieser hat die Aufgabe, die Flüssigkeit aus dem Prozessraum zu entfernen und so die strahlbasierte Verfestigung zu ermöglichen.

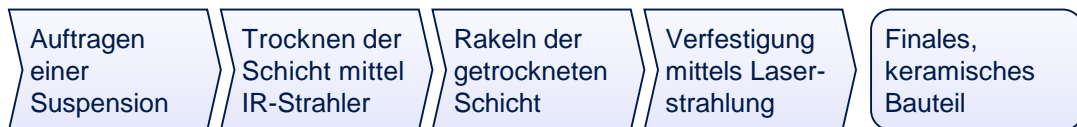


Abbildung 3-4: Vereinfachter Ablauf zur Herstellung keramischer Bauteile mit Trocknungsphase (vgl. Yen et al. 2005)

YEN konnte durch diesen Ablauf keramische Suspensionen mit einer minimalen Schichthöhe  $h_p$  von 15  $\mu\text{m}$  erzielen (YEN ET AL. 2005). In Abhängigkeit von der Energiedichte  $E_V$  kann dabei ein Grünling mit verminderten mechanischen Eigenschaften (TANG & LI 2005) oder ein funktional einsetzbares keramisches Bauteil erzeugt werden (YEN ET AL. 2005).

#### 3.4.2 Prozesseinflussgrößen beim Strahlschmelzprozess

Der Strahlschmelzprozess wird von mehr als 130 verschiedenen Parametern, sowohl Stör- als auch Kontrollgrößen, beeinflusst. Es konnten dabei 10 % der Parameter als ausschlaggebend für die Bauteilqualität identifiziert werden (REHME 2010). Viele der Faktoren besitzen eine gegenseitige Wechselbeziehung, sodass das bislang unzureichend erforschte Zusammenspiel eine reproduzierbare Regelung erschwert (REHME & EMMELMANN 2005). Ziel mehrerer wissenschaftlicher Arbeiten war es, die Einflussfaktoren systematisch zu klassifizieren. So haben sich u. a. COREMANS, EISEN, REHME, SEHRT mit dem Strahlschmelzpro-

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

zess unter Verwendung verschiedener Legierungen befasst und jeweils eine Qualifizierungsmethode erarbeitet (COREMANS 1999, EISEN 2009, REHME 2010, SEHRT 2010). Ein abstrahiertes Modell wurde von KLOCKE erforscht (KLOCKE ET AL. 2003), um die Wechselwirkungen der wesentlichen Einflussgrößen abbilden zu können. Darin wurden drei Bereiche identifiziert: die *Scan*-Strategie, das Material und die Maschine. Ansätze bzgl. der *Scan*-Strategie sollen im Folgenden detailliert dargelegt werden. Das Material wird in Abschnitt 3.5 adressiert. Auf die Maschine wird nicht näher eingegangen, da eine Anlagenentwicklung nicht der Betrachtungsfokus der Arbeit sein soll.

Die Komplexität des Strahlschmelzprozesses verdeutlicht sich vor allem bei der Strahl-Stoff-Wechselwirkung. Die Definition des materialspezifischen Prozessfensters ist durch die Vielzahl der Wechselwirkungen schwierig. Die Parameter sind für jeden Werkstoff sehr sorgfältig zu wählen. Ganz besonders trifft dies auf die Qualität der Belichtung zu, weshalb es nicht verwundert, dass hierzu vielfältige Forschungsarbeiten durchgeführt wurden. TOLOCHKO stellte die Absorptionskoeffizienten von verschiedenen Strahlquellen und Materialien einander gegenüber. Es konnte eine eindeutige Abhängigkeit zwischen Wellenlänge und Werkstoff ermittelt werden (TOLOCHKO ET AL. 2000). Weiterhin hat die *Scan*-Strategie einen großen Einfluss auf die Eigenspannungen im Bauteil und damit die Bauteilqualität. MERCELIS führte hierzu umfangreiche Analysen durch (MERCELIS & KRUTH 2006). So ist sowohl die Richtung als auch die Länge des *Scan*-Vektors entscheidend (MEINERS 1999). Kleine Belichtungsvektoren mit wechselnder Richtung vermindern das Spannungsniveau und verringern die auftretenden Maxima und Minima (BRANNER 2010, MERCELIS & KRUTH 2006). Basierend auf dieser Erkenntnis wurden *Scan*-Strategien mit stochastischer Verteilung abgeleitet (HERZOG 2000). Darüber hinaus kann durch die Variation der Belichtungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der *Scan*-Vektorlänge die Bauteilqualität erhöht werden (LOHNER & WILKENING 1996).

Es zeigt sich, dass das vom Strahlmedium erzeugte komplexe Temperatur- und Spannungsfeld im Pulverbett und Werkstück zu Verzug und Delamination führen kann (BRANNER 2010, NIEBLING 2005). So haben NIEBLING und BRANNER mittels numerischer Modelle den Strahlschmelzprozess abgebildet, um die Wirkung des Temperaturgradienten sowie die sich schnell bewegende Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstoff zu untersuchen. Durch die hohe Energiedichte im Strahlfokus und das daraus resultierende Aufschmelzen der Pulverpartikel kann es zu *Balling*-Effekten, Eigenspannungen und Deformationerscheinungen kommen (KRUTH ET AL. 2004B, LUTZMANN 2010). Durch diese und

weitere Einflussgrößen wird die Prozessierbarkeit der Werkstoffe festgelegt. Das Prozessfenster für die Verarbeitung von Materialien mit dem Ziel, bestimmte Eigenschaften (z. B. geringe Restporosität) zu erzeugen, kann mitunter eng begrenzt sein (DOLL ET AL. 2009) und ist materialspezifisch.

### 3.4.3 Alternative Verfestigungsmechanismen

Neben strahlbasierten Fertigungstechnologien gibt es weitere Möglichkeiten, Pulverkörner zu einem stoffschlüssig zusammenhängenden Festkörper zu verbinden.

So ist das Festphasensintern durch Druck (BOIVIE ET AL. 2006, ROCK & GILMAN 1995) in industriellen Anwendungen weit verbreitet. Viele Hartstoffkörper werden über diesen Verfestigungsmechanismus produziert. Der hohe Druck versintert die Randbereiche der Körner, sodass benachbarte Partikel eine stoffschlüssige Verbindung in Form von Sinterhälsen eingehen. Je nach Material variiert der dazu notwendige Druck. Dieser Verfestigungsmechanismus wurde im Rahmen des MPP verwendet (KARLSEN 1998). Der Aufbau komplexer Geometrien erfordert ein zusätzliches *Support*-Material, das dem hohen Druck im Sinterprozess standhalten muss und nach Fertigstellung des Bauteils entfernt werden kann (BOIVIE ET AL. 2006).

Als weitere Verfestigungsmechanismen werden die chemisch induzierte Bindung durch beispielsweise Polymerisation (GODLINSKI 2005, ZÄH ET AL. 2010A) sowie das elektrische Sintern (ALLEN ET AL. 2008) genannt. Beim elektrischen Sintern wird durch das Anlegen einer Spannung die für den Sinterprozess notwendige Wärme erzeugt. Dabei können Nanopartikel in kurzen Prozesszeiten zu einfachen Strukturen versintert werden.

Über diese alternativen Mechanismen lassen sich nur bedingt hochdichte Strukturen herstellen, sodass meist eine Infiltration oder weitere anschließende Sinterprozesse (z. B. Vakuumsintern, HIP) unabdingbar sind. Im Bereich des Strahlschmelzens kann jeder Werkstoff mit schmelzflüssiger Phase verarbeitet werden (KRUTH ET AL. 2001). Der folgende Abschnitt 3.5 soll die bereits erarbeiteten Forschungsergebnisse im Bereich der Materialverarbeitung dokumentieren.

### 3.5 Werkstoffe für Schichtbauverfahren

#### 3.5.1 Vorgehensweise

Die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Verfestigungsmechanismen lassen sich in vier Kategorien einteilen (siehe Abbildung 2-1, S. 9). Die strahlbasierten Fertigungsverfahren können dabei sowohl dem Bereich des Flüssigphasensinterns als auch dem des vollständigen Aufschmelzens zugeordnet werden (vgl. Abschnitt 2.2 und Abschnitt 3.4). Die allgemeingültige Differenzierung der prozess- und materialabhängigen Verfestigungsmechanismen hilft zum Verständnis der metallurgischen Vorgänge sowie bei der Einteilung der Materialsysteme. KRUTH fasste in einem Klassifizierungsschema alle Möglichkeiten der Verfestigung von formlosen bzw. -neutralen Materialien zusammen (KRUTH ET AL. 2005).

Im Folgenden werden die verschiedenen Werkstoffe beleuchtet sowie Kombinationsmöglichkeiten vorgestellt. Ausgehend von der monomateriellen Verarbeitung von ein- und zweikomponentigen Werkstoffen werden die Ergebnisse bisheriger Hartstoffverarbeitung sowie erste Ansätze zur Multimaterialverarbeitung bei additiven, strahlbasierten Fertigungsverfahren dargestellt.

#### 3.5.2 Grundmaterialien

Im Bereich des Sinterns konventioneller metallischer Werkstoffe werden meist Materialkombinationen verschiedener Schmelzpunkte verarbeitet. Dabei kann das Strukturmaterial sowohl in flüssiger Phase gesintert als auch mittels Polymerbinder oder Infiltraten verfestigt werden (KRUTH ET AL. 2001). Im Folgenden werden nur die Schmelz- und Sinterwerkstoffe ohne Binder- und Infiltrationsmaterialien betrachtet. Es lassen sich eine Vielzahl an Werkstoffen finden, die für den Strahlschmelzprozess qualifiziert wurden. KRUTH erarbeitete hierzu eine umfangreiche Zusammenstellung, auf welche an dieser Stelle verwiesen wird (KRUTH ET AL. 2007).

Die Auswahl der Grundwerkstoffe, die im Strahlschmelzprozess verwendet werden sollen, richtet sich nach den gestellten Anforderungen der späteren Anwendung. Bei funktionalen Bauteilen kommen sowohl Aluminium- als auch Titanlegierungen zum Einsatz (OVER 2003, VANDENBROUCKE 2008, ZHANG 2004). Eisenbasislegierungen finden sowohl in der Herstellung von Bauteilen (1.4404) (MEINERS 1999, YASA & KRUTH 2009) als auch im Werkzeug- und Formenbau



Verwendung. Bei letzterem wird vorwiegend auf Werkzeugstähle (z. B. 1.2709, 1.4332) zurückgegriffen (MAYER 2009, OVER 2003). Diese zeichnen sich durch eine thermische Nachbehandelbarkeit aus, um Gefüge und Härte an die gestellten Rahmenbedingungen anzupassen (HUFTLESS 2005). BECKER konnte eine CuNi-Si-Legierung (Hovadur<sup>®</sup> K220) mit hohen Wärmeleitfähigkeitswerten für den Werkzeug- und Formenbau mit einer Restporosität von weniger als 1 % für das Strahlschmelzen qualifizieren (BECKER ET AL. 2009). Darüber hinaus wurde von UCKELMANN CoCr und von VANDENBROUCKE eine CoCrMo-Legierung für medizintechnische Anwendungen für den Strahlschmelzprozess qualifiziert (UCKELMANN 2007, VANDENBROUCKE 2008). Für Turbinen aus der Luft- und Raumfahrtbranche sind Nickelbasislegierungen auf Grund ihrer erhöhten Wärmebeständigkeit relevant. KLOCKE (2.4668), RAMAS (Mar-M247) und SEHRT (2.4665) haben hier erwähnenswerte Ergebnisse erzielt (KLOCKE & WAGNER 2002, RAMOS ET AL. 2002, SEHRT 2010).

Weiterhin kann durch gezieltes Verändern der Legierungszusammensetzung der Schmelzprozess und dadurch die spätere Bauteilqualität beeinflusst werden (ROMBOUTS 2006). Zur Verbesserung der Schmelzbadstabilität wurden bei Eisenbasislegierungen verschiedene Legierungselemente getestet (KRUTH ET AL. 2007). Vermehrte Beimengung von Sauerstoff, Silizium und Titan beispielsweise führen zu verminderter Oberflächenqualität. Geringe Mengen Kohlenstoff hingegen vermindern den Schmelzpunkt und vergrößern so das Prozessfenster, beeinflussen jedoch auch die Duktilität des Materials. Weiterhin kann durch die Reduktion des Anteils der Eisenoxide das Benetzungsverhalten verbessert werden (ROMBOUTS 2006). Es zeigt sich, dass für Grundmaterialien bereits auf ein breites Spektrum an Legierungen zurückgegriffen werden kann. KRUTH bewertete die Schmelzbarkeit unterschiedlicher Pulvermischungen aus Fe, Ni, Cu und Fe<sub>3</sub>P (KRUTH ET AL. 2004A). Durch die gezielte Auswahl der Legierungszusammensetzung und der Parameter kann die Porosität reduziert und die Verschleißbeständigkeit gesteigert werden (KUMAR & KRUTH 2008). Die Variation der Legierungszusammensetzung ist jedoch nur in gewissen Grenzen möglich. Für weitreichende Eigenschaftsänderungen ist es notwendig, zusätzliche Werkstoffe für den Strahlschmelzprozess zu qualifizieren.

### 3.5.3 Hartstoffe

#### 3.5.3.1 Einordnung der Hartstoffe

Hartstoffe grenzen sich durch ihren mehrphasigen Gefügebau gegen andere Werkstoffgruppen ab (PLEGGE 1994). Meist verbessert eine gezielte Materialmischung die Verarbeitbarkeit von Hartstoffen. Dabei wird ein hochschmelzender Werkstoff (Strukturmaterial, Hartstoffpartikel) mit einer niedrignschmelzenden Komponente (Bindermaterial) gemischt (KRUTH ET AL. 2001, PLEGGE 1994). Das resultierende Pulver vereint dadurch die gewünschten Eigenschaften des Strukturwerkstoffes (z. B. Verschleißreduktion) mit der guten Verarbeitbarkeit des zähen Binderwerkstoffes. In Abhängigkeit von den Massenanteilen können die Eigenschaftsausprägungen gezielt gesteuert werden. Die Art, die Partikelform und die Korngrößenverteilung der in der Matrix eingelagerten metallischen und nichtmetallischen Hartstoffe bestimmen Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit des Verbundwerkstoffes (PLEGGE 1994). Signifikante Vorteile im Aufschmelzverhalten wurden bei Composite-Pulvern an Stelle zweier lose vermischter Pulvermaterialien festgestellt (KRUTH ET AL. 2001). Als mögliche Hartphasen kommen Boride, Silizide und Carbide zum Einsatz (ALEXANDRE 2007, PLEGGE 1994, WALKOWIAK 1997). Dabei kann das Pulvermaterial bereits in der vorgesehenen Legierungszusammensetzung – bestehend aus Struktur- und Bindermaterial – vorliegen oder über einen weiteren Schritt in die Bindermatrix einlegiert werden (PLEGGE 1994). Als Basislegierung wird gewöhnlich neben Eisen auch Kobalt und Nickel verwendet (WALKOWIAK 1997).

#### 3.5.3.2 Hartmetalle

Die Verarbeitung von Hartmetallen (vorwiegend WC/Co) mittels Flüssigphasensinterns wurde von verschiedenen Forschungseinrichtungen erforscht (KRUTH ET AL. 2001, MAEDA & CHILDS 2004, WANG ET AL. 2002). Der geringe Anteil an Binderphase (< 9 % Co) führt zu einer hohen Restporosität von 40 - 60 %. Dies macht nachgelagerte Prozesse (z. B. Infiltration mit Bronze) zur gezielten Reduktion der Poren erforderlich (KRUTH ET AL. 2001). Unter Verwendung von Composite-Pulvern konnten die Dichte der Grünlinge gesteigert und die Oberflächenrauheit reduziert werden (KRUTH ET AL. 2001). Überdies wurden die Bauteilqualität sowie die Prozesseffizienz bei den partiell aufschmelzenden Prozessen durch die zunehmende Laserleistung gesteigert (GLÄSER ET AL. 2008). GLÄSER konnte die Restporosität auf weniger als 10 % bei einem Co-Anteil von 25 % reduzieren

(siehe Abbildung 3-5). Bei Hartmetallen (z. B. WC/Co) hängt der Porenanteil der Bauteile nicht nur von der eingebrachten Energiedichte, sondern auch maßgeblich vom Anteil des Bindermaterials des Composite-Pulvers ab. Mit zunehmendem Anteil der Binderphase und der Energiedichte reduziert sich die Restporosität (GLÄSER ET AL. 2008).

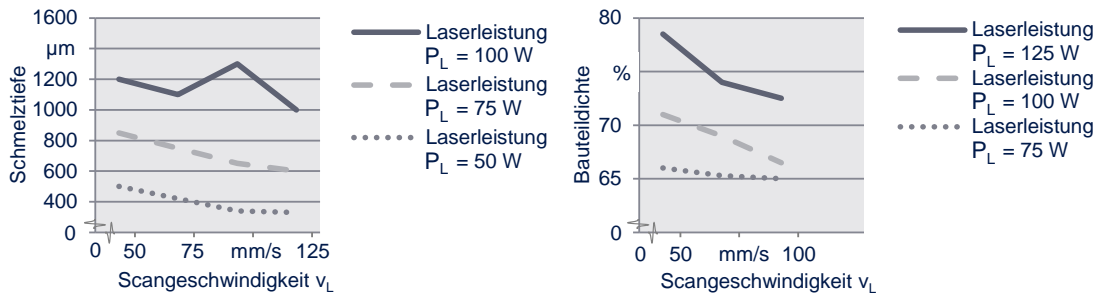


Abbildung 3-5: Schmelztiefe und Bauteildichte für WC/Co 75/25 (vgl. Gläser et al. 2008)

Der Einfluss der Gefügeparameter auf die Schichtqualität spielt auch bei der Rissausbreitung eine nicht unerhebliche Rolle. Dabei sind die Auswirkungen der Karbid- und der Bindephase auf den Risswiderstand essentiell (SIGL 1986). Die duktile Bindephase wirkt hierbei risshemmend.

Die Kombination verschiedener Basislegierungen mit Hartstoffen wie Carbiden, Nitriden und Boriden wurde systematisch von WALKOWIAK für das Laserbeschichten untersucht (WALKOWIAK 1997). Es wurde im Vergleich zum einsetzgehärteten Stahlwerkstoff eine deutliche Steigerung hinsichtlich der Verschleißbeständigkeit ermittelt, wodurch die Standzeit und damit die Leistungsfähigkeit entsprechender Bauteile im abrasiven und adhäsiven Verschleißkontext verbessert werden konnte.

#### 3.5.3.3 Keramiken und Cermets

Keramiken zeichnen sich durch eine geringe Dichte  $\rho_F$ , große Härte, chemische Beständigkeit und hohe Festigkeit aus (ADER 2002). Daher sind auch in diesem Bereich Anstrengungen unternommen worden, diese für die strahlbasierte Fertigung zu qualifizieren. Jedoch ist die Verarbeitung der Keramiken aus folgenden Gründen schwierig: Zum einen sind die Lasersysteme bestehender Anlagen auf metallische Werkstoffe ausgelegt. Keramiken weisen eine gute Absorption bei Wellenlängen  $\lambda_L$  größer 1064 nm auf (TOLOCHKO ET AL. 2000). Zum anderen

besitzen Cerments keinen definierten Schmelzpunkt, was das gezielte Aufschmelzverhalten erheblich erschwert (REHME & EMMELMANN 2005).

WILKES untersuchte neben  $ZrO_2$  auch  $Al_2O_3$  und  $MgAl_2O_4$ . Ziel war es, das Material vollständig aufzuschmelzen, ohne auf metallische oder gläserne Bindemittel zurückzugreifen. Es konnten Dichtheitswerte von nahezu 100 % erzielt werden (WILKES & WISSENBACH 2007). Darüber hinaus befasste sich EXNER mit der Verarbeitung von  $Al_2O_3$  unter Verwendung von  $SiO_2$ . Er konnte Bauteile mit einer Dichte von 90 % anfertigen (EXNER ET AL. 2006). Es stellte sich heraus, dass das Sintern von Keramik oder auch Glas nicht ohne weiteres in Schichtbauprozessen möglich ist. Für hochwertige Bauteile ist die Interaktion zwischen Anlage und Werkstoff abzustimmen. Ein Ansatz, verschleißbeständige Materialien wie Keramiken auf breiter Basis verarbeitbar zu gestalten, ist durch sogenannte Ceramic reinforced Metal Matrix Composites (CMMC) bzw. Ceremts (vgl. Abschnitt 3.5.3.2) gegeben. Dabei wird die Keramik, vorwiegend Oxide und Carbide, in eine Metallmatrix integriert. So kombinierte LAOUI WC-Partikel mit einer Cu-Matrix und qualifizierte die Werkstoffkombination für die additive Fertigung (LAOUI ET AL. 2000). Darüber hinaus erwähnt KRUTH weitere CMMC-Paarungen in seinem Überblick (KRUTH ET AL. 2007), beispielsweise TiC mit Ni, Co oder Mo. Die Einbettung von  $ZrO_2$  in ein Ni-Fe-System verdeutlicht, dass die Wahl des Mengenverhältnisses zwischen Struktur und Matrix Freiräume erlaubt (PETERSEN & EMMELMANN 2005). Durch den Aufschmelzprozess kann auf einen anschließenden Infiltrationsprozess verzichtet und eine hohe Maßhaltigkeit des Bauteils sichergestellt werden (WILKES & WISSENBACH 2007).

#### 3.5.4 Materialkombinationen

##### 3.5.4.1 Notwendigkeit von Materialkombinationen

Durch die Entwicklung vom *Rapid Prototyping* hin zum *Rapid Manufacturing* bzw. *Rapid Tooling* rückt die funktionale Einsetzbarkeit additiv erzeugter Bauteile zunehmend in den Fokus. Die Kombination mehrerer Materialien, z. B. durch Beschichten, erwies sich als eine probate Möglichkeit, den stetig steigenden Bauteilanforderungen gerecht zu werden. Der zähe Grundwerkstoff nimmt die mechanischen Belastungen auf, wohingegen die Verschleiß- oder die Korrosionsbeanspruchung durch den Beschichtungswerkstoff abgefangen wird (PLEGGE 1994).

Die Verbindung zweier Strukturen kann auf verschiedenen Wegen realisiert werden. So lassen sich kraft-, form- und stoffschlüssige Methoden anwenden (LINDEMANN 2011). Kraft- und formschlüssige Verbindungsmechanismen sind ihrerseits stark von der geometrischen Ausprägung der jeweiligen Teilstrukturen (z. B. Oberflächenrauheit) abhängig. Die stoffschlüssigen Verbindungen ermöglichen ein flexibles und vielfältiges Einsatzspektrum. Wie aus der Schweißtechnik bekannt ist, gibt es allerdings Einschränkungen in der Kombinierbarkeit der Materialien (POHLE 1999, SCHULZE 2004). Die intermetallische Zwischenschicht der stoffschlüssigen Verbindung kann sowohl als diskreter (vgl. Abschnitt 3.5.4.2) als auch als gradierter Übergang (vgl. Abschnitt 3.5.4.3) gestaltet werden.

### 3.5.4.2 Diskreter Übergang

Es existieren zwei prinzipielle Haftmechanismen bei Schichtverbänden. Zum einen ist die Festigkeit bei thermisch gespritzten Schichten von der mechanischen Verklammerung der rauen Substratoberfläche mit dem Beschichtungsmaterial abhängig. Hierbei sind Form- und Kraftschluss die dominierenden Prinzipien (SCHULZ 1987). Zum anderen ist der Stoffschluss bei strahlbasierten Fertigungs- und Beschichtungsverfahren der vorherrschende Haftmechanismus. Bei diesen kann von einer vollwertigen schweißtechnischen Verbindung zweier Materialien gesprochen werden (NOWOTNY ET AL. 1993). Die Durchmischung der aufgetragenen Schicht mit der darunterliegenden führt zu einer Grenzschicht (intermetallische Zwischenschicht), die beide Materialien beinhaltet (AL-JAMAL ET AL. 2008). Die *Durchmischung* beschreibt die Qualität der Vermischung der beiden Werkstoffe. Die Haftfestigkeit beider Schichten wird hierbei maßgeblich von der Schweißbarkeit der Werkstoffe bzw. der Werkstoffkombination beeinflusst. Abhängig vom Aufmischungsgrad lässt sich bei kleinen Dimensionen von einem Schichtverbund, bei großen von einem gradierten Übergang sprechen (WEISHEIT & FUCHS 2006). Der *Aufmischungsgrad* wird dabei als Verhältnis des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffes zum Gesamtvolumen des aufgeschmolzenen Materials definiert. Die Eindringtiefe ist abhängig von der aufgetragenen Schichthöhe und der eingebrachten Volumenenergiedichte (MEINERS 1999).

Es konnten bereits verschiedene stoffschlüssige Materialkombinationen, die mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt wurden, untersucht werden. Beispielfolgend sollen folgende angeführt werden:

- Kupfer und Stahl (X40CrMoV5-1) (AL-JAMAL ET AL. 2008)

### 3 Stand der Forschung und Technik

---

- Stahl (1.2709) und WC/Co (GLÄSER & KLOCKE 2009)
- Kobalt und WC/Co (DOLL ET AL. 2009)
- Kupfer und Eisen-Nickel unter Verwendung einer Bindschicht (WEISHEIT & FUCHS 2006)

Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Matrix und Hartstoff, aber auch von Substrat und Beschichtung, können Eigenspannungen verursachen (DOLL ET AL. 2009, PLEGGÉ 1994). Dies führt in letzter Instanz zum Abplatzen der Verschleißschichten. Durch Bindschichten oder durch sogenannte gradierte Schichtsysteme kann der sprunghafte Konzentrationswechsel von einem Material auf das andere Material vermindert werden.

#### 3.5.4.3 Gradiertes Übergang

Gradierte Aufbauten bieten die Möglichkeit eines stetigen Materialüberganges. Dieser kontinuierliche Werkstoffwechsel ermöglicht es, rissfreie Strukturen aus einem Metall-Hartstoff-Verbund zu produzieren (THEILER 2003). Bei konventionellen thermischen Dickschichtbeschichtungsprozessen werden Eigenspannungen in die Funktionsfläche eingebracht. Dies ist durch erneutes Aufschmelzen der tieferliegenden Schichten, aber auch durch Überlappungen der einzelnen aufgetragenen Beschichtungsbahnen verursacht. Der hohe Temperaturgradient und die stark voneinander abweichenden Materialeigenschaften können zur Rissbildung oder Delamination führen (THEILER ET AL. 2001). Die Prozesssicherheit sowie die Qualität der generierten Werkzeuge können durch die Verwendung gradierten Übergänge verbessert werden. Dies ist bei strahlbasierten Fertigungstechnologien jedoch aktuell nur mittels pulverbettloser Systeme möglich, da eine hohe Flexibilität in der Pulverzuführung und im Mischungsverhältnis erforderlich ist. Unter Verwendung von gradierten Übergängen wurden folgende Materialkombinationen aufgebaut und untersucht:

- NiBSi und Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (THEILER ET AL. 2001)
- NiBSi und WC/Co (THEILER ET AL. 2001)
- Ni-Basislegierung (2.4668) und Ti-Basislegierung (3.7164) (DOMACK & BAUGHMAN 2004)

Die Analysen von DOMACK und BAUGHMAN dokumentieren, dass durch Gradiierung der Materialzusammensetzung Risse in der Übergangszone nicht immer gänzlich vermieden werden können (DOMACK & BAUGHMAN 2004). Bei den Untersuchungen wurden zwei verschiedene Materialausgangsformen, sowohl

Pulver als auch Draht, gewählt. Trotz des kontinuierlichen Übergangs ist die stoffschlüssige Verbindung zweier Materialien an metallurgische Gesetzmäßigkeiten der Schweißbarkeit gebunden.

### 3.6 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

#### 3.6.1 Zusammenfassung

Wie die voranstehenden Abschnitte veranschaulichen, existieren in den Bereichen der Schüttguttechnik und der additiven Fertigungsverfahren vielfältige Forschungstätigkeiten. Durch die zunehmende prozesstechnische Charakterisierung der Pulversysteme mittels sowohl experimenteller als auch theoretischer bzw. simulativer Methoden steigt die Kenntnis über die interpartikulären Wirkzusammenhänge. Es kann konstatiert werden, dass mannigfaltige Lösungsansätze existieren, von sehr allgemeingültigen bis hin zu sehr detaillierten und problem-spezifischen Modellen. Für die bisherigen Forschungsschwerpunkte der Schichtbauverfahren spielen prozesstechnische Pulvermodelle jedoch keine Rolle.

Bei den strahl- und pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren lag der Fokus vorwiegend auf einer tiefgreifenden Prozessdurchdringung und dem Aufbau eines detaillierten Prozessverständnisses. Es wurden vielfältige Einflussgrößen auf die monomaterielle Verarbeitung untersucht und so die Möglichkeiten und die Grenzen des Schichtbauprozesses analysiert. Darüber hinaus wurden einzelne Teilprozesse erweitert und eine Optimierung hinsichtlich singulärer Zielgrößen (z. B. Oberflächenqualität) durchgeführt. Die Forschungstätigkeiten im Bereich der Auftragsprinzipien weisen eine analoge Richtung auf. Für strahl- und pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren wurden sporadisch Ansätze der Pulverbereitstellung bewertet. Jedoch existiert bislang keine Möglichkeit, mehrere Werkstoffe dreidimensional zu kombinieren und so beispielsweise eine Beschichtung in ein beliebig komplex geartetes Bauteil oder Werkzeug zu integrieren.

Die Bandbreite der Werkstoffe, die bei den strahlbasierten Fertigungsverfahren verarbeitet werden können, nimmt stetig zu. So können nicht nur klassische Konstruktionswerkstoffe, sondern auch Hartmetall- oder Keramikpulver zu Bauteilen verfestigt werden. Die Forderung der Multimaterialverarbeitung kann aus der Vielzahl der schmelz- und sinterbaren Werkstoffe und dem Wunsch nach anforderungsgerechten Bauteilen abgeleitet werden. Die fehlenden prozesstechnischen

Voraussetzungen bei den strahl- und pulverbettbasierten Schichtbautechnologien limitieren die Verfahrensflexibilität erheblich.

#### 3.6.2 Ableitung des Handlungsbedarfs

Die systematische Weiterentwicklung der additiven Fertigung hin zur Multimaterialverarbeitung ist das Ziel dieser Arbeit. Um die bisherigen Schichtbauprozesse für die parallele Verarbeitung von zwei oder mehr Werkstoffen zu befähigen, ist der Prozessablauf zu flexibilisieren. Durch die Erforschung eines makroskopischen Vorgehensmodells sollen die Voraussetzungen für die Multimaterialverarbeitung geschaffen werden. Dieses Modell wiederum wird durch die Erforschung und Integration neuer Teilprozesse (Subprozesse) für die Bereitstellung und das Aufschmelzen des Beschichtungspulvers vervollständigt. Wie im Stand der Forschung dargelegt, wurden bereits singuläre Ansätze zur Pulverdosierung erarbeitet. Die Integration eines Auftragsmechanismus in den strahl- und pulverbettbasierten Schichtbauprozess wurde bislang noch nicht betrachtet. Basierend auf der mikro- und makroskopischen Prozessmodellierung werden die pulverbettbasierten additiven Prozesse für die Verarbeitung geometrisch komplexer Werkstoffkombinationen befähigt.

Des Weiteren ist auf Grundlage geeigneter Pulversysteme ein Auftragsprinzip abzuleiten, um Substrat und Beschichtungsstoff integriert additiv aufzubauen. Dies impliziert, die Werkstoffpartikel zu charakterisieren und bei der Auslegung des Auftragsmoduls zu berücksichtigen. Überdies sind die Prozessrobustheit und damit die Bauteilreproduzierbarkeit bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Dadurch gilt es, die Prozessflexibilität weiter voranzutreiben und vom monomateriellen Prozess hin zur dreidimensionalen Multimaterialverarbeitung zu erweitern.

Die Alleinstellungsmerkmale der additiven Multimaterialverarbeitung, insbesondere die flexible und stoffschlüssige Werkstoffkombination und die geometrische Gestaltungsfreiheit, gilt es anhand exemplarischer Bauteile zu validieren. Die Bewertung des Prozesses sowie der Bauteile wird neben den technologischen Einflussgrößen, die sich aus der schichtbaubasierten Multimaterialverarbeitung ergeben, auch die Fertigungskosten und die -dauer berücksichtigen. Die Gestaltungsfreiheit additiv erzeugter Bauteile setzt, im Speziellen bei Materialkombinationen, des Weiteren eine neue Methodik bei der Qualifizierung der Ausgangswerkstoffe sowie bei der Bewertung der erstellten Festkörpereigenschaften voraus. Der Forderung nach einem Fertigungsprozess für qualitativ hochwertige



### **3.6 Zusammenfassung und Handlungsbedarf**

---

und kundenindividuelle Bauteile wird damit Rechnung getragen. So hat die Erforschung des Multimaterialprozesses, im Speziellen bei der Beschichtung komplexer Werkzeuge und Bauteile, großen Anteil daran, die Schichtbauverfahren weiter zu flexibilisieren.



# 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

## 4.1 Motivation zur Prozessmodellierung

In seinen Grundzügen wurde der Ablauf des monomateriellen Strahlschmelzprozesses bereits in Abschnitt 2.3 erläutert. Wie im Kapitel 3 dargelegt wurde, können mit dem Laserstrahl viele verschiedene Materialien aufgeschmolzen werden. Der aktuelle Prozessablauf verhindert es jedoch, mehrere Materialien gleichzeitig zu einem 3D-Multimaterialbauteil zu fügen. Die Zielsetzung des Kapitels leitet sich aus dem bislang ungenutzten Potential der Schichtbauverfahren ab, der mangelnden Kombinierbarkeit von Materialien, welches hier anhand von je einem Substrat- und einem Beschichtungswerkstoff systematisch dargestellt wird. Zu Beginn wird ein übergeordneter Prozessablauf definiert sowie die Vernetzung der Subprozesse beschrieben (vgl. Abschnitt 4.2). Darauf aufbauend erfolgt die Auswahl geeigneter Auftragsprinzipien (vgl. Abschnitt 4.3) sowie die Modellierung der Subprozesse (vgl. Abschnitt 4.4). Als *Subprozesse* werden in dieser Arbeit einzelne Funktionen des gesamten *Prozessablaufes* definiert, die in sich abgeschlossen sind (z. B. Pulverauftragen). Im letzten Abschnitt wird der Einfluss der Grundplattenvorheizung auf die Qualität von Multimaterialbauteilen bewertet (vgl. Abschnitt 4.5).

## 4.2 Modellierung der Multimaterialverarbeitung

### 4.2.1 Definition eines Prozessablaufes

Unter Verwendung eines flächigen Pulverauftrags wird die Geometrieinformation des Bauteils nur durch den Laser in das Pulverbett übertragen. Sollen mehrere Materialien gleichzeitig in einer Schicht verarbeitet werden, ist dies nicht mehr ausreichend. Deshalb muss die Geometrieinformation auch an das Pulverauftragsmodul weitergeleitet und darin verarbeitet werden. Die Informationsverarbeitung ist vom verwendeten physikalischen Prinzip des Multimaterialauftrags abhängig. Wird die Elektrofotographie (BAKKELUND 1997, KARLSEN 1998) gewählt, so muss das Wissen bereits bei der Pulveraufnahme am sog. Xerox-Element vorliegen, sodass das Pulver nur an den vorgegebenen Stellen haften bleibt. Bei einer Pulverdüse (MEINERS & WISSENBACH 2007, YANG & EVANS

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

2010) zur punktuellen Materialeinbringung wird die Information an das Auslassventil sowie die entsprechenden Positionsaktoren übermittelt und bei der Pulverabgabe berücksichtigt. Dazu sind die Geometrieinformationen bereits bei der Datenaufbereitung entsprechend der späteren Pulverzuteilung notwendig.

### 4.2.2 Prozessablauf

Das Modell des Prozessablaufes beschreibt die Vernetzung aller am Prozess beteiligten Subprozesse. Werden mehrere Materialien zu einem Bauteil gefügt, so können verschiedene Prozessabläufe verwendet werden (vgl. Abschnitt 3.3). Um einen möglichst schlanken und effizienten Gesamtprozess, d. h. Verzicht auf nicht wertschöpfende Teilprozesse (z. B. Reinigung), zu erhalten, wurde das in Abbildung 4-1 dargestellte Vorgehen gewählt.

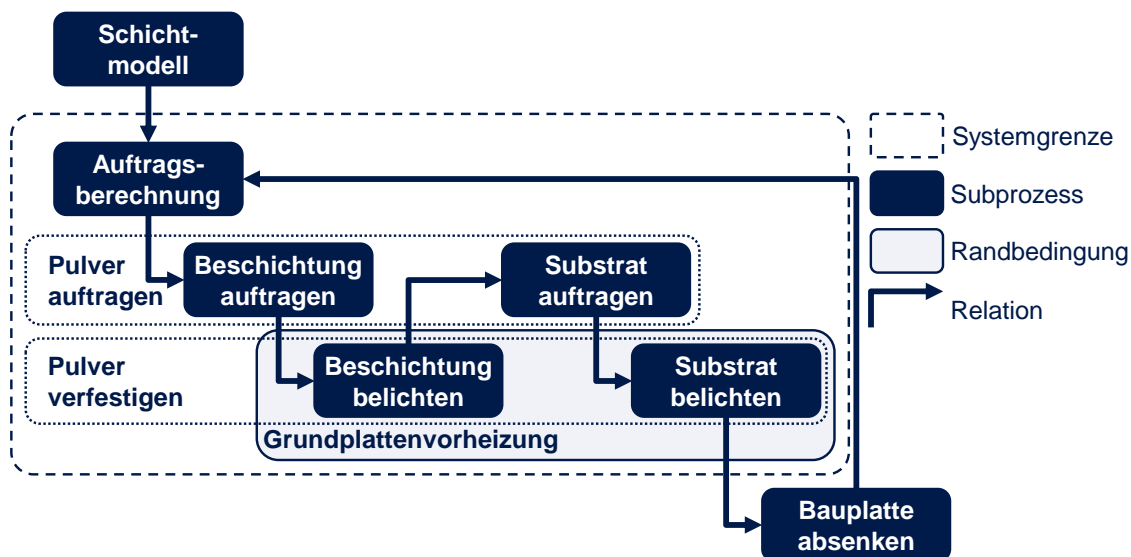


Abbildung 4-1: Vorgehen bei der multimateriellen Bauteilherstellung für eine Schicht

Analog zur Prozessvorbereitung bei monomateriellen Bauteilen (vgl. Abschnitt 2.3.3) werden durch „Slicen“ aus dem 3D-CAD-Volumenmodell einzelne Schichtmodelle geschnitten. Diese bilden den Ausgangspunkt für den multimateriellen Prozessablauf. Um die Beschichtung aus einem anderen Werkstoff fertigen zu können, gilt es diese durch den Subprozess „Auftragsberechnung“ aus dem Schichtmodell zu extrahieren und in verarbeitbare Koordinaten zu transformieren. Ist dies erledigt, so kann der eigentliche Fertigungsprozess starten. Dieser besteht aus den zwei Prozessschritten „Pulver auftragen“ und „Pulver verfestigen“ für jeweils die Beschichtung und das Substrat.

Zuerst wird das Beschichtungspulver anhand der zuvor berechneten Koordinaten aufgetragen. Die daraus resultierende selektiv aufgetragene Pulverspur wird anschließend aufgeschmolzen. Dadurch wird das Pulver bereits zu einem Festkörper vereint und es wird verhindert, dass bei nachfolgenden Auftragsvorgängen die beiden Pulverwerkstoffe vermischt werden können. Ist das Beschichtungspulver verfestigt, so kann das Substratpulver aufgetragen werden, welches ebenso unmittelbar nach dem Auftragsprozess mittels Laserstrahlung aufgeschmolzen wird. Nach Abschluss aller Auftrags- und Verfestigungsvorgänge wird die Bauplattform abgesenkt und der Ablauf wird für die nächste Schicht wiederholt.

Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf den Aufschmelzvorgang und damit die Bauteilqualität hat die Temperatur des Baufeldes. Die Effekte der Grundplattenvorheizung während des Bauprozesses werden im Abschnitt 4.5 anhand thermografischer Aufnahmen und thermischer Kennwerte dargelegt.

In den nachfolgenden Abschnitten sollen nun die Auftragsprinzipien gewählt (vgl. Abschnitt 4.3) und darauf aufbauend die Subprozesse detailliert werden (vgl. Abschnitt 4.4).

### 4.3 Auswahl der Auftragsprinzipien

Um die Subprozesse beschreiben zu können, sind die Auftragsprinzipien auszuwählen. Die Zielsetzung dieser Arbeit beinhaltet, einen Prozess bereitzustellen, um Multimaterialbauteile, welche aus einem Substrat- und einem Beschichtungswerkstoff bestehen, zu fertigen. Anhand einer einfachen Abschätzung des Verhältnisses zwischen Beschichtungsfläche  $A_B$  und Substratfläche  $A_S$  sollen die Auftragsprinzipien festgelegt werden.

Ausgehend von zwei senkrechten Zylindern mit einer 0,5 mm bzw. einer 1,0 mm breiten Beschichtung an der gesamten Oberfläche werden die Flächenverhältnisse zwischen Substrat und Beschichtung veranschaulicht (siehe Abbildung 4-2). Mit steigendem Radius  $r$  des Zylinders steigt die Querschnittsfläche des Substrates quadratisch, wohingegen die Beschichtungsfläche ein lineares Wachstum aufweist. Durch die überproportionale Zunahme der Substratfläche ergibt sich ein kritischer Schnittpunkt. Dieser Punkt charakterisiert identische Flächenverhältnisse.

Bei sehr ausgewogenen Flächen ist es ratsam, flächige Auftragsprinzipien zu wählen, um eine hohe Prozessgeschwindigkeit zu erzielen. Da die Beschich-

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

tungsfläche bei einer Breite von 0,5 mm bzw. 1,0 mm bereits ab einem Radius  $r$  größer gleich 1,75 mm bzw. 3,4 mm kleiner ist, als die des Substrates, können zwei unterschiedliche Auftragsprinzipien ausgewählt werden.

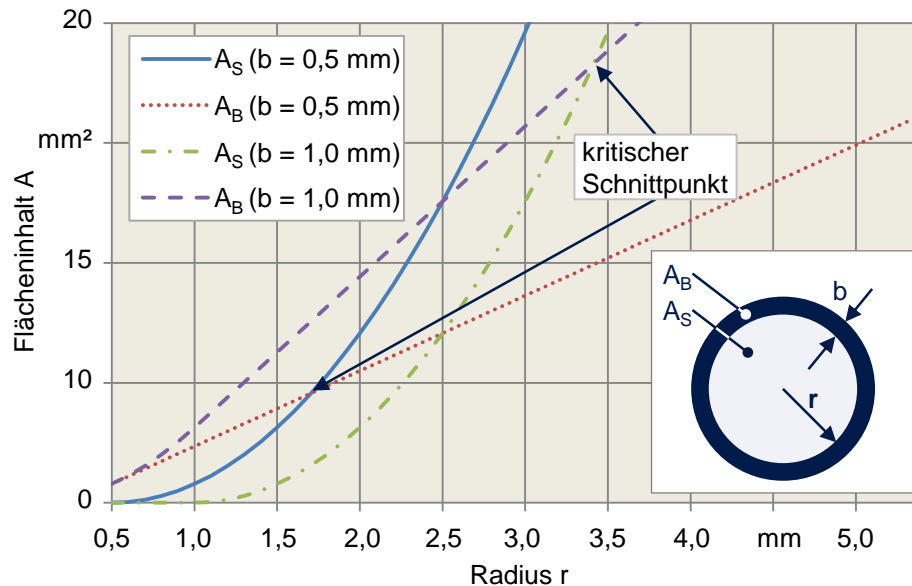


Abbildung 4-2: Verhältnis von Radius zu Flächeninhalt von Beschichtungsfläche  $A_B$  und Substratfläche  $A_S$  für die Konturbreiten von 0,5 mm und 1,0 mm bei kreisförmigen Bauteilquerschnitten

Im Rahmen dieser Arbeit sollen hierzu ein selektiver und ein flächiger Auftragsmechanismus verknüpft werden, sodass durch das selektive Auftragsprinzip das Beschichtungspulver und durch den flächigen Auftragsmechanismus das Substratmaterial in die Bauebene eingebracht wird. Durch die Kombination der beiden Mechanismen können zwei Werkstoffe in kurzer Zeit zu einem Multimaterialbauteil vereint werden (vgl. Zeitbetrachtung in Abschnitt 7.4.1). Darüber hinaus kann das resultierende Auftragsmodul flexibel um weitere selektive Auftragsmechanismen ergänzt werden, wodurch einerseits durch Kaskadierung die Auftragsrate gesteigert und andererseits zusätzliche Werkstoffe aufgetragen werden können.

Der flächige Auftragsmechanismus beruht auf dem bereits bestehenden Rakelprinzip für monomaterielle Schichtbauverfahren, der selektive Pulverauftrag erfolgt mittels einer Düse. Die Verbindung von Rakel- und Düsenmechanismus legt eine spezifische Reihenfolge der Subprozesse nahe. So sieht die Prozessabfolge in einem ersten Schritt den gezielten Pulverauftrag (Düse) mit anschließendem Aufschmelzen des Pulvers vor. Dadurch wird das Pulver bereits zu einem Festkörper vereint und verhindert das Vermischen der Werkstoffe. Das Substrat-

material füllt die Bauebene an allen Stellen, mit Ausnahme des bereits erhöhten Konturverlaufs. Abschließend wird das flächig aufgetragene Material mit den werkstoffspezifischen Parametern aufgeschmolzen und mit den bereits vorhandenen Feststoffbahnen des ersten, selektiv aufgetragenen Materials stoffschlüssig verbunden (vgl. Abschnitt 6.3).

Bei flächig eingebrachten Werkstoffpartikeln wird die Struktur des Bauteils nur durch den Laserstrahl definiert. Somit muss die Schichtinformation bei multimateriellen Strukturen sowohl durch die Pulverdüse als auch durch den Laserstrahl übertragen werden. Deshalb ist es zielführend für jedes Material, die zusammenhängenden Prozessbausteine, bestehend aus Auftrag und Aufschmelzen, sequenziell abzuarbeiten. Die dabei verwendeten Subprozesse werden im Abschnitt 4.4 detailliert.

### 4.4 Beschreibung der Subprozesse

#### 4.4.1 Vorgehensweise

Für das schichtweise Aufschmelzen und Verfestigen mehrerer Materialien in einer Ebene bleiben die Grundzüge der oben beschriebenen Vorgehensweise (vgl. Abschnitt 2.3.4) weiterhin anwendbar. Multimaterialbauteile sind dadurch charakterisiert, dass in mindestens einer Schicht mindestens zwei Materialien örtlich getrennt vorhanden sind (vgl. Abschnitt 2.2). Um mehr als einen Werkstoff je Ebene zielgerichtet zu einem Festkörper verarbeiten zu können, ist eine Adaption des Schichtbauprozesses erforderlich.

Im Folgenden werden die Subprozesse „Auftragsberechnung“ (vgl. Abschnitt 4.4.2), „selektiver Pulverauftrag“ (vgl. Abschnitt 4.4.3) und „selektives Belichten“ (vgl. Abschnitt 4.4.4) des Beschichtungswerkstoffes sowie „flächiger Pulverauftrag“ (vgl. Abschnitt 4.4.5) und „selektives Belichten“ (vgl. Abschnitt 4.4.6) des Substratmaterials genauer betrachtet. Die Abfolge der Subprozesse orientiert sich dabei am bereits vorgestellten übergeordneten Prozessablauf (siehe Abbildung 4-1).

#### 4.4.2 Auftragsberechnung

Um das Beschichtungsmaterial gezielt in der Bauebene platzieren zu können, gilt es die relevanten Informationen aus dem Produktmodell zu extrahieren und den

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

Subprozessen für den Pulverauftrag und das selektive Belichten des Beschichtungswerkstoffes zur Verfügung zu stellen. Dabei wird das dem additiven Fertigungsprozess zugrunde liegende Schichtmodell in die Bestandteile Beschichtung und Substrat aufgegliedert und der jeweilige Werkstoff zugeordnet (siehe Abbildung 4-3). Dadurch ist es möglich, Bauteile mit einem spezifischen Werkstoff zu beschichten. Dabei ist die Komplexität des Bauteils ohne Einfluss auf den additiven Fertigungsprozess und es können Multimaterialstrukturen gemäß der Zielsetzung und Definition generiert werden (vgl. Abschnitt 2.2).

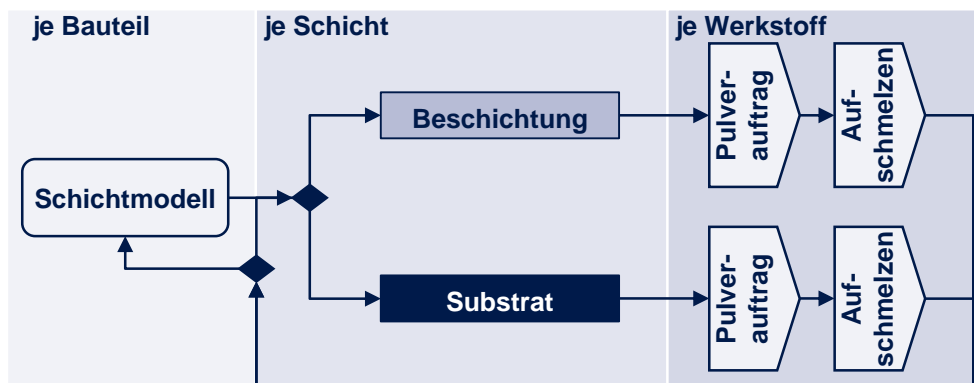


Abbildung 4-3: Modell der Datenverarbeitungskette für das Generieren beschichteter Bauteile

Das Substratpulver wird, im Gegensatz zum Beschichtungswerkstoff, durch einen flächigen Materialauftrag bereitgestellt, sodass hierzu keine weiterführenden Berechnungen zur Positionierung durchzuführen sind. Die Beschichtung ist durch spezifische Koordinaten gekennzeichnet, welche dem selektiven Auftragsmechanismus zur Verfügung gestellt werden müssen. Dazu sind weitere Berechnungsschritte erforderlich. Nachstehende Abbildung verdeutlicht anhand einer einfachen Bauteilgeometrie die Informationsverarbeitungskette für den Pulverauftrag der Beschichtung (siehe Abbildung 4-4).



Abbildung 4-4: Datenverarbeitungskette vom Schichtmodell bis zum selektiven Pulverauftrag



Bei der Pfadberechnung für den Materialauftrag wird die Konturinformation des Bauteils aus der Schichtdatei entnommen und mit einem flächigen Gitternetz mit variabler Maschenweite  $a_p$  überlagert. Jeder Schnittpunkt des Gitters mit dem Konturverlauf ergibt einen Punkt für die Pulvereinbringung. Je geringer der Gitterabstand ist, desto dichter ist der Konturverlauf und desto höher ist die Detaildarstellung der Multimaterialbauteile.

Um die Breite der Beschichtung  $b_p$  möglichst gering wählen zu können, ist die Minimierung der selektiv aufgetragenen Pulvermenge eine wichtige Voraussetzung. Dazu ist es unerlässlich, sich mit den Pulvereigenschaften bzw. dem Auftragsmechanismus auseinanderzusetzen (vgl. Fließfähigkeitsbewertung Kapitel 5). Nach der Datenaufbereitung wird jeder der beiden Werkstoffe (jeweils für Beschichtung und Substrat) im jeweils zugehörigen Subprozess aufgetragen und an der vorgesehenen Stelle aufgeschmolzen und verfestigt.

### 4.4.3 Selektiver Pulverauftrag der Beschichtung

Voraussetzung für die selektive Pulvereinbringung sind Informationen über die Lage der Beschichtung in der Bauebene und über die einzubringende Pulvermenge. Der Pulverwerkstoff ist durch eine geeignete Pulverbevorratung bereitzustellen und durch die Dosiereinheit zielgerichtet an den gewünschten Stellen aufzutragen.

Dazu wird der Subprozess in drei Schritten sukzessive durchlaufen. Zuerst wird das Beschichtungspulver der Düse der Dosiereinheit zugeführt. Danach wird die gewünschte Koordinate im Bauraum angefahren und die eingestellte Pulvermenge selektiv aufgetragen. Im letzten Schritt gilt es die aufgetragenen Pulvervolumina zu nivellieren. Dies ist erforderlich, um ein homogenes Bauteilwachstum und damit eine hohe Bauteilqualität gewährleisten zu können.

Für den selektiven Pulverauftrag werden die Auftragspunkte, wie in Abschnitt 4.4.2 dargestellt, berechnet. Der dafür entwickelte Algorithmus ist im Anhang beigefügt (vgl. Abschnitt 10.1). Die ermittelten Punkte werden durch eine Kinematik einzeln angefahren und an jedem dieser Punkte wird eine definierte Pulvermenge durch die Dosiereinheit abgegeben.

Die vorgegebene Gittermaschenweite legt die Auflösung des Pulverauftrags  $a_p$  individuell fest (siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-4).

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

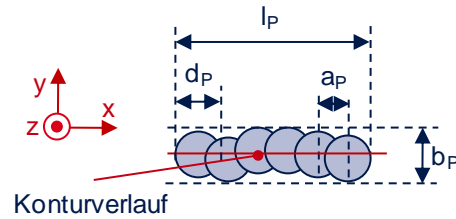


Abbildung 4-5: Geometrische Größen des selektiven Pulverauftrags

Somit ist es möglich, sowohl einzelne Pulveranhäufungen (z. B. selektiver Verschleißschutz) als auch durchgängige Materialbahnen (z. B. Beschichtungen) zu erzeugen. Jede abgegebene Pulvermenge wird dabei durch den Durchmesser  $d_p$  charakterisiert.

Ziel der Pulverdosierung ist es, einen möglichst geringen Durchmesser  $d_p$  zu erzielen. Um die Geometrie des Pulvervolumens zu beschreiben, wird der Durchmesser  $d_p$  als der Abstand der am weitesten auseinander liegenden Pulverkörner definiert. Dies gewährleistet für den späteren Aufschmelzprozess ein vollständiges Verfestigen des aufgetragenen Pulvers. Die Form der abgegebenen Pulvermenge kann auf Grund der selbstfließenden Eigenschaften des Pulvers durch eine kegelförmige Verteilung beschrieben werden (Abbildung 4-6).

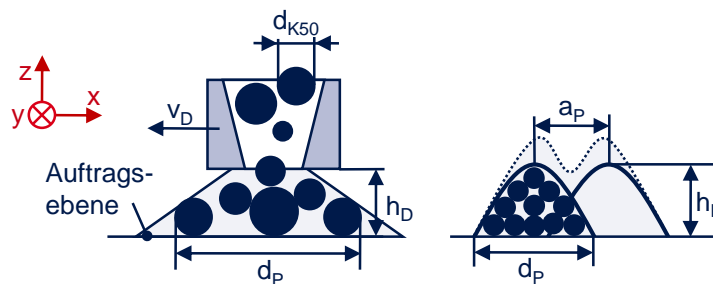


Abbildung 4-6: Geometrische Beschreibung des Pulverauftrags mittels einer Düse

Die gewählte Maschenweite des Gitters gibt den Abstand der Pulverdosierungen  $a_p$  vor. Wird dieser sehr klein gewählt, so wird eine große Menge Pulver pro Fläche eingebracht. Bei zu großem Gitterabstand kann keine durchgängige Pulverspur gewährleistet werden. Es zeigte sich, dass sich der Durchmesser  $d_p$  mit zunehmendem Abstand  $h_D$  vergrößert (siehe Tabelle 5-5, S. 89). Für eine sehr fein dosierte Pulverauftragsspur ist es daher zielführend, die Düse mit möglichst geringem Abstand  $h_D$  zur Auftragsebene zu bewegen. Die Höhe des Pulverauftrags  $h_P$  wird durch die Variablen  $h_D$  und  $d_{K50}$ , das arithmetische Mittel der

Pulverkornfraktionierung, beschränkt. Es ergibt sich folgender Zusammenhang (vgl. Gleichung 4-1):

$$d_{K50} < h_P < h_D \quad (4-1)$$

Für die Modellentwicklung wird die Vereinfachung getroffen, dass alle Körner den Durchmesser  $d_{K50}$  besitzen. Die Streuungen der flächigen Pulvereinbringung resultieren aus der beschränkten Auftragsgenauigkeit der Düse. Die aufgetragenen Pulveransammlungen können sowohl in der Breite als auch in ihrer Position variieren, sodass sich die Breite einer geraden Pulverbahn zwischen den Größen  $d_P$  bzw.  $b_P$  wiederfindet (siehe Abbildung 4-5). Werden die Ungenauigkeiten der Auftragskinematik vernachlässigt, so ist  $d_P = b_P$ . Darüber hinaus kann die Länge der aufgetragenen Pulverspur durch Gleichung 4-2 angegeben werden:

$$l_P = a_P \cdot n + d_P \quad (4-2)$$

Die Anzahl der Pulverauftragsvorgänge pro Länge der Pulverbahn wird durch die Variable  $n$  beschrieben. Ziel ist es, eine möglichst schmale Spur aufzutragen. Aus dieser Forderung ergibt sich die ebene Auftragsqualität  $\Delta_{xy}$  durch folgende Gleichung:

$$\Delta_{xy} = \frac{b_P}{d_{K50}} \quad (4-3)$$

Strebt  $\Delta_{xy}$  aus Gleichung 4-3 gegen den Wert 1, so wird eine Pulverbahn, bestehend aus einzelnen aneinandergereihten Körnern, aufgetragen. Dieser Zustand entspricht der minimal möglichen Breite.

Ist der Auftragsprozess abgeschlossen, gilt es die Pulverspur mittels hochenergetischer Strahlungsquellen aufzuschmelzen und zu verfestigen.

### 4.4.4 Selektives Belichten des Beschichtungspulvers

Der Belichtungsprozess für das Beschichtungspulver setzt eine Pulverbahn mit bekannter Ausdehnung und Position im Bauraum voraus. Diese wird durch den vorgeschalteten selektiven Pulverauftrag erzeugt. Darüber hinaus ist die material-spezifische Energiedichte  $E_V$  durch die Laserstrahlquelle bereitzustellen, um das lose Pulvermaterial zu verfestigen.

Das selektive Belichten des Beschichtungswerkstoffes wird in drei Schritten vollzogen. Zuerst gilt es, die Geometriedaten, bestehend aus Position und Volumen der Pulverspur, zu laden. Darauf basierend werden die notwendigen Verfeste-

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

tigungsparameter eingestellt und im letzten Schritte das Material belichtet. Durch das selektive Abfahren der Pulverspur mit dem Laserstrahl wird das Beschichtungspulver stoffschlüssig mit der darunter liegenden Schicht verbunden. Die Bahnplanung des Laserstrahls ist in Abhängigkeit vom Verlauf der Pulverbahn durchzuführen. Die korrelierenden Größen sind dabei die Breite und die Länge der Pulver- und der Laserbahn. Der Fokus des Laserstrahls besitzt einen Durchmesser  $d_L$  von 100 bis 200  $\mu\text{m}$ , sodass die Breite der Pulverbahn  $b_P$  im Regelfall um ein Vielfaches größer ist (siehe Tabelle 5-6, S. 90). Dies erfordert, im Gegensatz zu klassischen *Scan*-Strategien, mehr als nur ein einfaches Abfahren der Bauteilkontur (siehe Abbildung 4-7). Für das vollständige Aufschmelzen des selektiv eingebrachten Pulvers ist die Dimension des *Scan*-Vorgangs durch  $b_L$  und  $l_L$  an die Pulverbahn anzupassen. Dabei ist die Flächenausdehnung des Belichtungsmusters größer als die der Pulverbahn zu wählen. Der entstandene Überhang definiert den Sicherheitsfaktor des belichteten Feldes für das vollständige Aufschmelzen des selektiv eingebrachten Beschichtungsmaterials und kann für die Länge  $l_L$  mit  $\Delta l_L$  und die Breite  $b_L$  mit  $\Delta b_L$  verschiedene Maße annehmen.

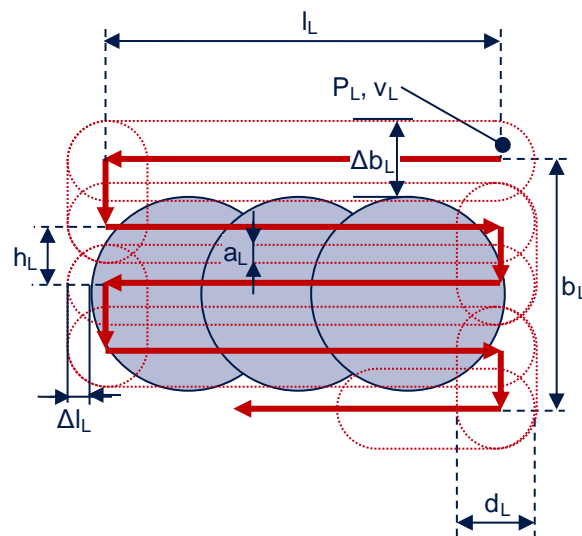


Abbildung 4-7: Selektives Aufschmelzen und Verfestigen einzelner Beschichtungspulverbahnen

Für die Berechnung der Laserbahn werden der Fokusdurchmesser und die Pulverbahn einander überlagert. Durch Aneinanderlegen von  $n$  Laserbahnen kann ein flächiges *Scan*-Muster erzeugt werden. Der gewählte Abstand der Bahnen ist durch den *Hatch*-Abstand  $h_L$  charakterisiert. Werden  $h_L$  und der Überlappungsgrad  $a_L$  addiert, ergibt sich der Wert  $d_L$ . Aus Untersuchungen der monomateriellen Verarbeitung wurde ein Überlappungsgrad von 30 % (MEINERS 1999) für die

beste Qualität bezüglich Schichtebenheit und -zusammenhalt ermittelt. Die erhaltene geometrische Ausprägung der aufgeschmolzenen Fläche kann durch folgende Gleichungen beschrieben werden (vgl. Gleichung 4-4 und Gleichung 4-5):

$$l_L + d_L = l_P + 2 \cdot \Delta l_L \quad (4-4)$$

$$b_L + d_L = b_P + 2 \cdot \Delta l_B = (d_L - a_L) \cdot n \quad (4-5)$$

Basierend auf den Gleichungen 4-4 und 4-5 wird die *Scan*-Strategie im Abschnitt 5.4 bzw. Kapitel 6 zur Herstellung von Multimaterialbauteilen gewählt.

Ist der Schmelzprozess abgeschlossen, kann mit dem nächsten Schritt im Fertigungsprozess, dem Auftragen eines weiteren selektiven Pulvers oder aber dem flächigen Pulverauftrag des Substratmaterials, begonnen werden.

### 4.4.5 Flächiger Pulverauftrag des Substrates

Der flächige Auftrag des Substratpulvers erfolgt mittels Rakelmechanismus. Dazu ist es notwendig, das Pulver zu bevorraten und für den Schichtauftrag bereitzustellen. Darüber hinaus müssen Informationen über die gewünschte Schichthöhe  $h_P$ , die Höhe der Beschichtung  $h_F$  sowie die Partikeldurchmesser  $d_K$  beim Schichtauftrag berücksichtigt werden. Für eine durchgängige Beschichtung müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

$$h_F < h_P \quad (4-6)$$

$$d_K < (h_P - h_F) \quad (4-7)$$

Gleichung 4-6 verhindert, dass die Rakel am bereits aufgeschmolzenen Pulver hängenbleibt. Ist die Differenz zwischen  $h_F$  und  $h_P$  jedoch zu groß, so kann es passieren, dass Substratpulver auf der Beschichtungsbahn liegen bleibt. Dies wiederum verursacht Lücken in der Beschichtung. Demnach ist als zweite Bedingung (vgl. Gleichung 4-7) erforderlich, den Abstand zwischen  $h_F$  und  $h_P$  kleiner als den kleinsten Partikeldurchmesser  $d_K$  der jeweiligen Pulverfraktion zu wählen.

Die Rakel erfüllt beim Pulverauftrag zwei Funktionen: Zum einen verteilt diese das Substratpulver gleichmäßig in den noch nicht ausgefüllten Bereichen der Bauebene, zum anderen wird durch die Nivellierung der Partikel ein homogenes Schichtwachstum gewährleistet (siehe Abbildung 4-8).

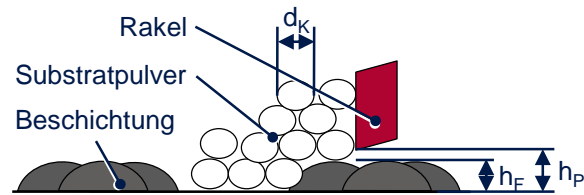


Abbildung 4-8: Flächiges Auftragen des Substratpulvers

Das beim Auftragsprozess überschüssige Pulver wird in Auffangbehältern gesammelt. Durch das vollständige Verfestigen des Beschichtungspulvers (vgl. Abschnitt 4.4.4) kann das Substratpulver für nachfolgende Fertigungsprozesse wieder verwendet werden.

### 4.4.6 Selektives Belichten des Substrates

Um die Pulverschicht aufschmelzen zu können, ist neben der materialspezifischen Energiedichte  $E_V$  (vgl. Gleichung 2-1) auch die Information der Substratfläche (beschrieben  $x$ - und  $y$ -Koordinaten) erforderlich. Aus der Fläche können die Laserstrahlpfade abgeleitet werden. Diese sind mit einem Überhang  $\Delta b_L$  zu wählen, sodass Substrat- und Beschichtungswerkstoff stoffschlüssig miteinander verbunden werden können.

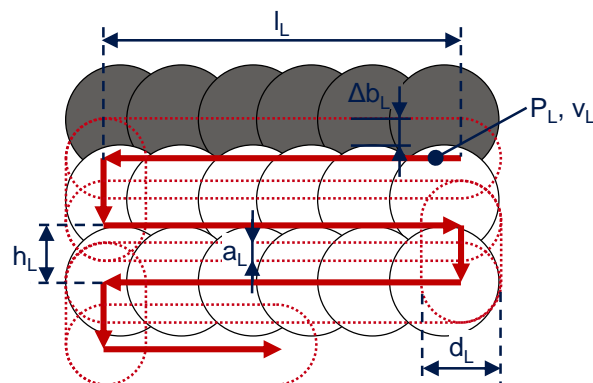


Abbildung 4-9: Selektives Aufschmelzen des flächig aufgetragenen Substratpulvers und stoffschlüssiges Verbinden beider Materialien

Werden die Schichtgeometriedaten mit Hilfe hochenergetischer Laserstrahlung abgefahren, so resultiert daraus eine Festkörperschicht, welche die Basis für die nächste Schicht darstellt. Die Pulverschicht kann auch durch mehrfaches Aufschmelzen in eine Festkörperschicht mit definierten Eigenschaften (z. B. Rauheit, Porosität) überführt werden.

## **4.5 Steuerbarer Wärmehaushalt bei der Multimaterialverarbeitung**

---

Sind die Eingangsdaten des Gesamtprozesses (siehe Abbildung 4-1) durch die Subprozesse vollständig verarbeitet, kann das resultierende Multimaterialbauteil entnommen werden.

### **4.4.7 Erkenntnisse aus der Modellierung**

Auf Grundlage des erarbeiteten Prozessmodells gilt es einen Auftragsmechanismus zu erforschen, der in der Lage ist, zwei Materialien je Schicht zu verarbeiten. Durch die modulare Kombination von punktuellen (Düse) und flächigem Pulverauftrag (Rakel) kann eine kurze Prozesszeit bei gleichzeitiger Bereitstellung mehrerer Materialien je Schicht gewährleistet werden (vgl. Kapitel 5).

Die Aufarbeitung der pulverbettbasierten, additiven Fertigungstechnologie durch die Definition abgegrenzter Modelle der Subprozesse ermöglicht die Integration von selektivem Pulverauftrag und Verfestigen in den bisher monomateriellen Schichtbauprozess. Durch die systematische Modellierung der Subprozesse konnten die wesentlichen Einflussgrößen identifiziert werden. Nun gilt es in den nachfolgenden Kapiteln 5 und 6, die charakteristischen Prozesseinflussgrößen für das Auftragen und Verfestigen zu bestimmen.

Neben der Pulverhandhabung bildet der Wärmehaushalt des Strahlschmelzprozesses eine weitere elementare und noch zu spezifizierende Einflussgröße zur Kombination unterschiedlicher Materialien (siehe Abbildung 4-1). Im anschließenden Abschnitt soll deshalb das Wirken unterschiedlicher Temperaturniveaus auf die Bauteilqualität durch den Einsatz einer Grundplattenvorheizung näher untersucht werden.

## **4.5 Steuerbarer Wärmehaushalt bei der Multimaterialverarbeitung**

### **4.5.1 Auftretende Wärmeübertragungsmechanismen**

Die additive Fertigung kann bei unterschiedlichen Basistemperaturen im Bau- raum durchgeführt werden. Die Variation des Wärmehaushalts fügt sich in das aufgestellte Prozessmodell (siehe Abbildung 4-1) nahtlos ein. Um die Wirkung der Grundplattenvorheizung zu verstehen, werden in diesem Abschnitt die auftretenden Wärmeübertragungsmechanismen beschrieben. Wärmeübertragung ge-

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

---

schieht durch drei Mechanismen, so genannte Wärmetransportphänomene (POLIFKE & KOPITZ 2005):

- Wärmestrahlung,
- Wärmeleitung und
- Konvektion.

Die Ausbildung von Temperaturgradienten innerhalb bzw. zwischen den Phasen (Festkörper, Schmelze und Pulver) kann als treibende Kraft für den Wärmefluss betrachtet werden (INCROPERA & DEWITT 2002). Die drei oben genannten Mechanismen werden im Folgenden mathematisch beschrieben.

Die Wärmestrahlung (Gleichung 4-8) lässt sich über das Stefan-Boltzmann-Gesetz charakterisieren. Sie ist abhängig von der Oberfläche  $A$  sowie der vierten Potenz der Temperaturdifferenz zwischen Körper und Umgebung. Darüber hinaus werden der Zustand (Pulver oder Festkörper) sowie die materialspezifischen Oberflächeneigenschaften durch den Emissionsgrad  $\varepsilon_i$  erfasst.

$$\dot{Q}_{\text{Wärmestrahlung}} = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_i^4 - T_\infty^4); i = F \text{ bzw. } P \quad (4-8)$$

Die Emissionskoeffizienten  $\varepsilon_i$  für Pulver (P) und Festkörper (F) für WC/Co 83/17 und 1.2709 können aus nachfolgender Tabelle 4-1 abgelesen werden. Diese wurden mittels Thermografie für drei Temperaturniveaus  $T_{BP}$  gemessen.

*Tabelle 4-1: Thermografisch ermittelte Emissionsgrade für WC/Co und Warmarbeitsstahl 1.2709*

	WC/Co 83/17		1.2709	
$T_{BP}$ [°C]	$\varepsilon_P$ [-]	$\varepsilon_F$ [-]	$\varepsilon_P$ [-]	$\varepsilon_F$ [-]
50	0,51	0,42	0,53	0,43
150	0,55	0,49	0,56	0,44
250	0,53	0,50	0,61	0,47

Es zeigt sich, dass  $\varepsilon$  sowohl für Pulver als auch für Festkörper mit zunehmender Temperatur geringer wird. Die ermittelten Emissionsgrade werden in der Konfiguration der Thermokamera für die optische Bewertung der angestrebten Grundplattenvorheizung zur gezielten Beeinflussung des Wärmehaushalts benötigt (siehe Abbildung 4-10).



## 4.5 Steuerbarer Wärmehaushalt bei der Multimaterialverarbeitung

Der Wärmefluss wird im Fall einer eindimensionalen Wärmeleitung durch eine Fourier-Differentialgleichung angegeben (vgl. Gleichung 4-9):

$$\dot{Q}_{\text{Heizung}} = \frac{\lambda_i}{h_F(z)} \cdot A_i \cdot (T_{BP} - T_F); i = F \text{ bzw. } P \quad (4-9)$$

Die Wärmeleitung wird durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_i$ , die Querschnittsfläche  $A_i$ , die Höhe des Festkörpers  $h_F(z)$  sowie den vorliegenden Temperaturgradienten festgelegt. Da die Wärme nicht nur durch den Festkörper geleitet, sondern auch über das Pulver abgezogen wird, gilt diese Gleichung sowohl für Festkörper ( $F$ ) als auch für Pulver ( $P$ ). Die Wärmeleitfähigkeit kann aus Gleichung 4-10 bestimmt werden.

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot a_{th}(T) \quad (4-10)$$

Die Dichte  $\rho(T)$  lässt sich mit einer Dichtewaage ermitteln. Die spezifische Wärmekapazität  $c_p(T)$  sowie die Temperaturleitfähigkeit  $a_{th}(T)$  können mittels NanoFlash<sup>TM</sup>-Methode entsprechend den geltenden Normen bestimmt werden (ASTM E1461 2007, DIN EN 821 2005, DIN 30905 1998, DIN 51936 2008). Die NanoFlash<sup>TM</sup>-Methode verwendet ein Blitzlicht zur thermischen Anregung und misst die Temperaturerhöhung mittels eines Thermosensors. Nachfolgende Tabelle 4-2 fasst die Ergebnisse zusammen:

*Tabelle 4-2: Zusammenfassung der Wärmeleitfähigkeit für WC/Co und Warmarbeitsstahl 1.2709*

	WC/Co 83/17		1.2709	
Dichte $\rho$ [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	7,46	11,83	5,22	8,02
$T_{BP}$ [°C]	$\lambda_P$ [W/(m · K)]	$\lambda_F$ [W/(m · K)]	$\lambda_P$ [W/(m · K)]	$\lambda_F$ [W/(m · K)]
50	0,234	10,974	0,255	14,980
150	0,235	12,076	0,266	17,863
250	0,235	12,143	0,268	18,791

In obiger Tabelle ist ersichtlich, dass die Wärmeleitfähigkeit für Pulvermaterialien ( $\lambda_P$ ) für WC/Co 83/17 um etwa den Faktor 47 und für 1.2709 um etwa den Faktor 59 kleiner ist, als für Festkörper ( $\lambda_F$ ). Darüber hinaus sind allerdings nur sehr geringfügige quantitative Änderungen bei unterschiedlichen Temperaturniveaus erkennbar. Dies ist vor allem auf die kleinen Kontaktflächen im Pulver zurückzuführen. Die gemessenen Festkörperwerte weisen hingegen eine deutliche Temperaturabhängigkeit auf.

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

Die erzwungene Konvektion wird i. A. als das Mitführen von Wärme in strömenden Flüssigkeiten oder Gasen definiert (POLIFKE & KOPITZ 2005). Diese wird durch nachfolgende Gleichung beschrieben (vgl. Gleichung 4-11):

$$\dot{Q}_{Konvektion} = \alpha_{th,i} \cdot A \cdot (T_i - T_{\infty}); i = F \text{ bzw. } P \quad (4-11)$$

$$\alpha_{th,i} = \frac{\lambda_i}{L} \cdot Nu(Re, Pr) \quad (4-12)$$

Der mittlere Wärmeübertragungskoeffizient kann durch die dimensionslose Nußelt-Zahl  $Nu$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_i$  sowie die charakteristische Länge  $L$  berechnet werden (vgl. Gleichung 4-12). Unter der Annahme, dass während des Fertigungsprozesses keine Strömung der Inertgase existiert, kann dieses Wärmeübertragungsphänomen vernachlässigt werden.

Auf Basis der aufgestellten mathematischen Beschreibungen wird die Bewertung der Vorheizung auf den strahlbasierten Schichtbauprozess durchgeführt.

### 4.5.2 Einfluss der Grundplattenvorheizung auf die Bauteilqualität

Die Integration einer Flächenheizung in den additiven Prozess ermöglicht es, unterschiedliche Temperaturniveaus im Bauraum bereitzustellen. Die Untersuchungen wurden anhand dreier Vorheizungen mit 50 °C, 150 °C und 250 °C durchgeführt (siehe Abbildung 4-10).

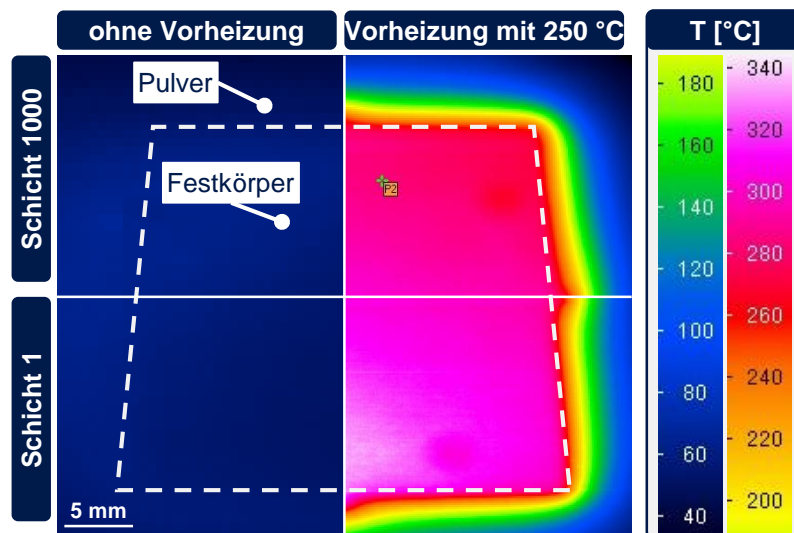


Abbildung 4-10: Thermografieaufnahmen eines additiv gefertigten Festkörpers nach Schicht 1 und Schicht 1000 unter Verwendung keiner Vorheizung sowie einer Vorheiztemperatur von 250 °C

## 4.5 Steuerbarer Wärmehaushalt bei der Multimaterialverarbeitung

---

Mittels Thermografie wurde die Temperaturverteilung in der Bauebene als Effekt der Grundplattenvorheizung aufgezeichnet. In unten abgebildeten Aufnahmen ist eine homogene Temperaturverteilung erkennbar.

Die Wärmeleitung des Festkörpers von der Grundplattenheizung bis zur Bauebene kann, aufgrund der homogenen Temperaturverteilung bei Schicht 1000, als dominanter Wärmestrom identifiziert werden. Alle weiteren Wärmetransportphänomene, bestehend aus Wärmeleitung im Pulverbett sowie Wärmestrahlung, verschlechtern die Homogenität der Temperaturverteilung nicht. Darüber hinaus kann sowohl bei Schicht 1 als auch bei Schicht 1000 ein nahezu identisches Temperaturniveau von mindestens 250 °C erzielt werden. Mehr als 300 °C konnten aus technischen Gründen nicht verwirklicht werden. Zur Bewertung der Funktion der Grundplattenvorheizung wurde ein Würfel mit einer Kantenlänge von 30 mm additiv gefertigt.

Die geringe Schichthöhe beim metallischen, additiven Fertigungsprozess, die bis zu 100 µm betragen kann, ermöglicht, dass sich die Bauebene im Bereich des Festkörpers während des Pulverauftrags gleichmäßig erhitzen kann. Die Wärmestrahlung des Festkörpers sowie die Wärmeleitung des Pulvers ist darüber hinaus ausreichend groß, um die 100 µm dicke Pulverschicht homogen zu erhitzen und so den Temperaturgradienten während des Verfestigens mittels Laserstrahlung zu reduzieren.

Der Einfluss der Grundplattenvorheizung kann auch qualitativ bewertet werden. Dazu wurde ein Prozessfenster, bestehend aus drei Parametern, bei den drei zu untersuchenden Temperaturniveaus  $T_{BP}$  variiert. Es wurde

- die Schichtstärke  $h_p$ ,
- die Laserleistung  $P_L$  sowie
- die *Scan*-Geschwindigkeit  $\vec{v}_L$  betrachtet.

Die aus Schichthöhe  $h_p$ , Laserleistung  $P_L$ , *Scan*-Geschwindigkeit  $v_L$  und *Hatch*-Abstand  $h_L$  berechnete Energiedichte  $E_V$  (Gleichung 2-1) kann in der letzten Spalte aus Tabelle 4-3 entnommen werden.

## 4 Prozessmodellierung zur Multimaterialverarbeitung

Tabelle 4-3: Übersicht der untersuchten Prozessparameter mit berechneter Energiedichte des Laserstrahls

$T_{BP}$ [°C]	$h_P$ [μm]	$P_L$ [W]	$v_L$ [mm/s]	$E_V$ [J/mm <sup>3</sup> ]
50	20 - 30	125 - 200	300 - 1900	2,1 - 5,0
150	20 - 30	125 - 200	300 - 1900	1,8 - 22,2
250	20 - 30	125 - 200	300 - 1900	2,3 - 20,0

Der Einfluss der Vorheiztemperatur wurde mittels einer variierenden Energiedichte  $E_V$  qualitativ bestimmt. Das Fehlerkriterium  $Z_F$  setzt sich aus der Porosität  $\rho_F$  und der Rissdichte  $\gamma_F$  für jeden Parametersatz zusammen. Je geringer  $Z_F$  ist, desto besser ist die Qualität des Festkörpers. Das Bewertungsvorgehen kann wie folgt beschrieben werden (vgl. Gleichung 4-19):

$$Z_F = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \rho_{F,i} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{F,i} \quad (4-19)$$

Die generierten Probekörper werden jeweils anhand dieses Bewertungskriteriums kategorisiert. Die qualitative Einordnung der Porosität, sowie der Rissdichte kann wie folgt wiedergegeben werden:

- 1 Punkt: gute Qualität (weniger als 5 % Poren oder Risse)
- 2 Punkte: mäßige Qualität (zwischen 5 % und 30 % Poren oder Risse)
- 3 Punkte: schlechte Qualität (mehr als 30 % Poren oder Risse)

Dabei wird die Porosität analog zur Gleichung 2-2 berechnet. Die Rissdichte ergibt sich aus dem Verhältnis der Risslänge zum Bauteilumfang. Gemessen an der Porosität und der Rissdichte lassen sich für jede Vorheiztemperatur  $T_{BP}$  drei charakteristische Bereiche erkennen (siehe Abbildung 4-11).

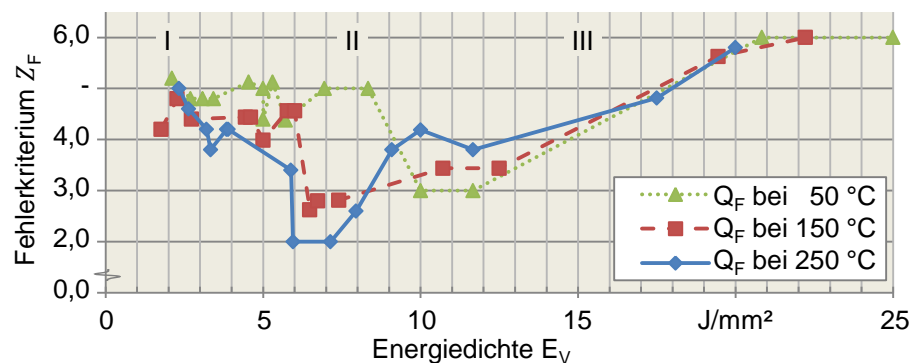


Abbildung 4-11: Vergleich des Temperatureinflusses auf die Bauteilqualität

In obiger Darstellung sind die Ergebnisse für  $T_{BP} = 50\text{ °C}$ ,  $150\text{ °C}$  sowie  $250\text{ °C}$  dargestellt. Dabei sind die Kenngrößen der Ordinatenachse qualitativ mit 1 bis 6 Punkten, wobei 1 Punkt sehr gut und 6 Punkte sehr schlecht sind, bewertet worden. In Bereich I sind sowohl viele Risse als auch Poren erkennbar. Dies ist bedingt durch die zu geringe Energiedichte und die daraus resultierende unzureichende stoffschlüssige Verbindung. Bereich III stellt das entgegengesetzte Extrem dar. Hier wird zu viel Energie eingebracht, was wiederum zu einer hohen Rissdichte und zu Poren führt. Poren in diesem Bereich bilden sich durch die Oberflächenspannung und den sog. *Balling*-Effekt (YADROITSEV 2009) aus. Das nutzbare Prozessfenster liegt in Zone II. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass die Quantität der Fehler mit zunehmender Vorheiztemperatur sinkt. Dies wiederum ist ein Indiz dafür, dass durch Vorheizung die Bauteilqualität schwer verarbeitbarer Werkstoffe (z. B. WC/Co) gesteigert werden kann. Die Qualitätssteigerung ist auf die Reduktion des Temperaturgradienten zurückzuführen. Den positiven Einfluss einer Grundplattenheizung erkannte auch MERCELIS in Bezug auf die verringerten Eigenspannungen als Ursache für auftretende Risse des Bauteils (MERCCELIS & KRUTH 2006).

## 4.6 Zusammenfassung

Für die Modellierung der additiven, strahl- und pulverbettbasierten Multimaterialverarbeitung wurde der Gesamtprozess in einzelne Subprozesse eingeteilt sowie die Einflussnahme der Grundplattenvorheizung auf die Bauteilqualität betrachtet.

Um die bisherige Datenverarbeitungskette der Schichtbauverfahren nutzen zu können, wurde eine Methode vorgestellt, Konturdaten in eine diskrete Punktwolke zu überführen, um diese wiederum für den selektiven Pulverauftrag für Beschichtungswerkstoffe zu verwenden. Darüber hinaus wurde das Schichtbauverfahren mittels eines Prozessablaufs und mehrerer Subprozesse beschrieben, um so ein einheitliches Grundverständnis für den Multimaterialprozess aufzubauen. Den entwickelten Prozessablauf sowie die Modelle der Subprozesse gilt es, in den nachfolgenden Kapiteln zu validieren.

Um Pulver mit dem erarbeiteten „Selektiven Pulverauftrag“ handhaben zu können, müssen die Pulvereigenschaften sowie die bestmögliche Gestaltung des Auftragsmoduls bzw. der Pulverdüse erforscht werden. Dies ist Gegenstand des nächsten Kapitels.



# 5 Fließfähigkeitsbewertung

## 5.1 Notwendigkeit der Fließfähigkeitsbewertung

Für die additive Fertigung, insbesondere aber für den selektiven Pulverauftrag, ist die Kenntnis der Material- bzw. der Pulvereigenschaften unerlässlich. Dieses Kapitel beschreibt deshalb die Erforschung einer methodischen Vorgehensweise zur Pulvercharakterisierung für den selektiven Auftragsmechanismus. Hierfür werden im Abschnitt 5.2 die Materialien ausgewählt sowie der Scher- und der Flussversuch anhand für den additiven Prozess geeigneter Materialien beschrieben. Darauf aufbauend wurde in Abschnitt 5.3 das selektive Auftragsprinzip auf den Schichtbauprozess übertragen. Abschließend folgt die Systementwicklung und Optimierung (vgl. Abschnitt 5.4).

## 5.2 Bewertung der Fließfähigkeit

### 5.2.1 Materialauswahl

Die in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 beschriebenen Versuche wurden auf Basis eines CMMC-Pulvers, bestehend aus einer Kombination von Hartstoffpartikeln (Wolframkarbid (WC)) und einer metallischen Bindematrix (Kobalt (Co)), durchgeführt. Aus verschiedenen Literaturquellen (HAACK 1974, SCHULZE 2009, TOMAS 2009) konnte entnommen werden, dass die Pulverfließfähigkeit von sehr unterschiedlichen, materialspezifischen Einflussfaktoren abhängig ist. Im Rahmen der nachfolgenden Versuche soll eine Auswahl dieser Faktoren analysiert werden:

- Korngröße und Korngrößenverteilung
- Oberflächenrauheit der Partikel
- Feststoffdichte und Porosität der Schüttung

Für die Versuche wurde eine WC/Co-Fraktion durch gezieltes Sieben und Sichten in vier verschiedene Pulvereinheiten zerlegt. Nachstehende Grafik verdeutlicht die Korngrößenverteilung der zu analysierenden Pulver (siehe Abbildung 5-1) sowie eine REM-Aufnahme zur Visualisierung der Korneigenschaften.

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

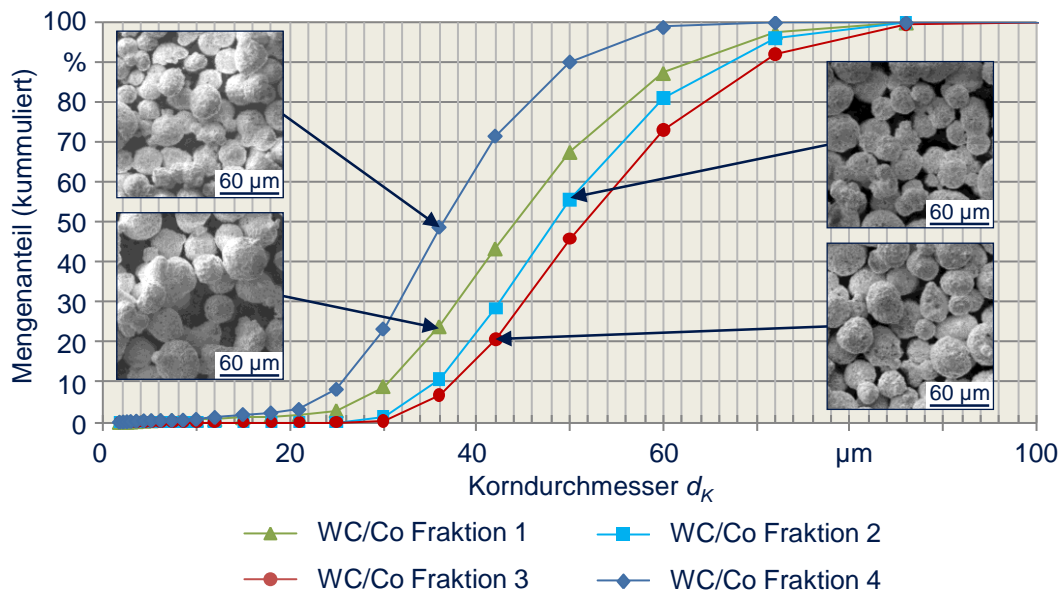


Abbildung 5-1: Kumulierte Korngrößenverteilung der vier analysierten WC/Co-Fraktionen

Die verwendeten Korngrößenverteilungen liegen innerhalb einer maximal gemessenen Verteilungsbreite von 15 µm bis 86 µm und haben somit marktübliche Korndurchmesser für den Schichtbauprozess.

Nachfolgende Tabelle 5-1 dokumentiert die genaue chemische Zusammensetzung und legt damit die Feststoffdichte der beiden untersuchten Materialmischungen des Hartstoffpulvers fest.

Tabelle 5-1: Chemische Zusammensetzung der Pulverproben

	W [%]	C [%]	Co [%]	Fe [%]
WC/Co 88/12	82,88	4,98	12,06	0,08
WC/Co 83/17	77,68	5,11	17,16	0,05

Basierend auf diesen Fraktionierungen sowie den oben genannten chemischen Materialzusammensetzungen wurden der Scherversuch (Abschnitt 5.2.2) sowie ein entwickelter Pulverflussversuch (Abschnitt 5.2.3) durchgeführt, um die Fließfähigkeit nicht kohäsiver Pulver für definierte Bohrungsdurchmesser als Basis des gezielten Pulverauftrags über eine Düse (vgl. Abschnitt 5.3) zu bewerten.



## 5.2.2 Scherversuch

### 5.2.2.1 Aufbau des Ringschergerätes und Versuchsdurchführung

Die Messung des Spannungszustandes innerhalb einer Pulverschüttung hat sich im Bereich der Fördertechnik etabliert (SCHULZE 2009). Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit und der vergleichsweise einfachen Versuchsdurchführung ist der Scherversuch sehr gut für diese Messungen geeignet. Abbildung 5-2 stellt den Aufbau des Ringschergerätes dar.

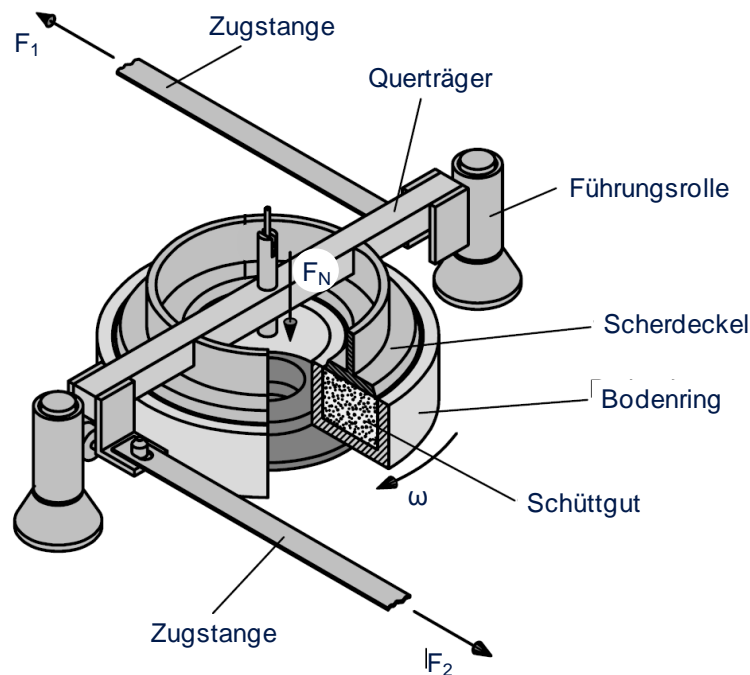


Abbildung 5-2: Aufbau des Ringschergerätes (Schulze 2009)

Dabei befindet sich die Schüttprobe im Bodenring und ist vom Scherdeckel bedeckt. Der darüber angebrachte Querträger wird mit einer vertikalen Kraft  $F_N$  belastet (siehe Abbildung 5-2), wodurch eine definierte Normalspannung  $\sigma$  im Schüttgut eingestellt wird. Zum Messen wird die Scherzelle mit dem Winkel  $\omega$  gedreht, der Deckel aber mit den Zugstangen am Drehen gehindert. Da die Unterseite des Deckels mit in das Schüttgut ragenden Mitnehmern versehen ist, kommt es so zur Scherverformung des Schüttgutes. Die im Schüttgut in Umfangsrichtung wirkende Schubspannung  $\tau$  errechnet sich aus den Kräften  $F_1$  und  $F_2$  in den Zugstangen.

Die Versuchsdurchführung erfolgt in zwei Schritten: Im ersten Schritt wird eine Pulverprobe bei definierter Spannung verdichtet, im zweiten Schritt wird die

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

---

Festigkeit gemessen. Die Belastung der Pulverprobe erfolgt nicht nur durch eine konstante Vertikalspannung  $\sigma$ , sondern zusätzlich auch durch eine Scherverformung. Diese führt zum Bruch der Pulverprobe. Dies ist schematisch in Abbildung 5-3 verdeutlicht.

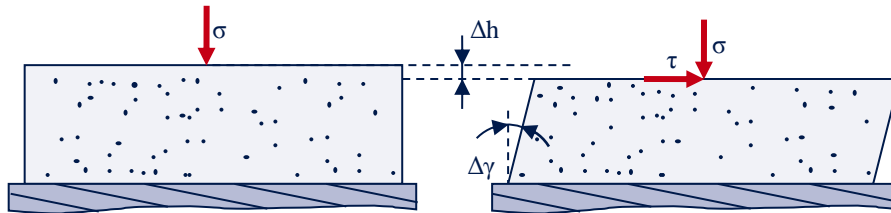


Abbildung 5-3: Erstbelastung der Schüttprobe (links) und Scherverformung (rechts) nach Schulze 2009

Zum Erreichen der Verformung ( $\Delta h$ ,  $\Delta \gamma$ ) muss eine Schubspannung  $\tau$  aufgebracht werden. Um die Pulverprobe zu verdichten, wird sie zunächst bei einer größeren Normalspannung  $\sigma$  so lange geschert, bis die Schubspannung  $\tau$  konstant ist. Damit ist die größtmögliche Festigkeit bei der beaufschlagten Normalspannung erreicht. Anschließend wird die verfestigte Probe noch einmal geschert, jedoch unter einer kleineren Normalspannung. Dabei kommt es dann, wie im zweiten Schritt des Druckversuchs, zum Bruch der Probe, sobald eine hinreichend hohe Schubspannung  $\tau$  erreicht wurde. Auf diese Weise wird ein Punkt der Fließgrenze („Fließort“) des verfestigten Schüttgutes gemessen.

Ein wichtiger Wert des Fließverhaltens ist die Fließfähigkeit  $ff_c$ , welche sich aus folgender Gleichung errechnet (vgl. Gleichung 5-1).

$$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (5-1)$$

Als ein weiteres Ergebnis jeder Fließortmessung kann die Schüttgutdichte  $\rho_b$  gewonnen werden. Diese entspricht der Pulverdichte, die mit der Spannung  $\sigma_1$  verfestigt wurde.

### 5.2.2.2 Ergebnisse des Scherversuchs

Die Fließfähigkeit einer jeden Probe wurde bei einer Verfestigungsspannung  $\sigma_1$  von ca. 4 kPa ermittelt. Dies repräsentiert eine geringe Belastung des Schüttgutes, ähnlich dem späteren Zustand des selektiven Auftragsmechanismus. Die eingestellten Werte können untenstehender Tabelle 5-2 entnommen werden.

Die ermittelten Fließfähigkeiten  $ff_c$  für die vier Proben (siehe Abbildung 5-1) sind sehr ähnlich. Mit einer Fließfähigkeit  $ff_c = 16$  bzw. 17 sind die Pulverfraktionen als frei fließend einzustufen. Signifikante Unterschiede in der Fließfähigkeit sind nicht festzustellen.

Mit der sogenannten dichtegewichteten Fließfähigkeit  $ff_\rho$  (SCHULZE 2009) kann der Pulverfluss unter Schwerkrafteinfluss bewertet und mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$ff_\rho = \frac{ff_c \cdot \rho_b}{1000 \text{ kg/m}^3} \quad (5-2)$$

Die dichtegewichtete Fließfähigkeit  $ff_\rho$  beschreibt die Fähigkeit eines Schüttgutes, unter Schwerkraft aus einem Behälter auszufließen. Die Gefahr der Brückenbildung (siehe Abbildung 5-8) ist umso geringer, je größer  $ff_\rho$  ist (siehe Tabelle 5-2).

*Tabelle 5-2: Ermittelte Fließfähigkeitswerte aus dem Scherversuch*

Probe	$\sigma_1$ [N/m <sup>2</sup> ]	$ff_c$ [-]	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$ff_\rho$ [-]
Fraktion 1	3854	17	5387	91,6
Fraktion 2	3835	17	5388	88,7
Fraktion 3	3817	16	5390	86,2
Fraktion 4	3810	17	5206	88,5
WC/Co 83/17	3763	17	5099	86,7

Auch die dichtegewichtete Fließfähigkeit führt zu keiner signifikanten Auffächerung der ermittelten Werte. Für eine detailliertere Analyse ist es deshalb zielführend, von einer makroskopischen zu einer mikroskopischen Betrachtung des Schüttgutes zu wechseln.

### 5.2.3 Flussversuch

#### 5.2.3.1 Aufbau des Pulverflussversuchs und Versuchsablauf

Neben den durchgeführten Scherversuchen wurde eine Flussversuchskonfiguration zur Ermittlung der Pulvereigenschaften entwickelt. Die Konzeption des Flussversuchs orientiert sich dabei an DIN ISO 4324 (1983). Bei den bisherigen

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

Betrachtungen wurde der minimal mögliche Düsendurchmesser jedoch nicht systematisch untersucht. Dies soll im Rahmen der folgenden Abschnitte geschehen.

Der verwendete Trichter als Hauptkomponente setzt sich aus mehreren Teilstücken zusammen. So wird das Pulver in den Vorratstrichter eingefüllt und gelangt über den Stutzen an die Düsenöffnung (siehe Abbildung 5-4).

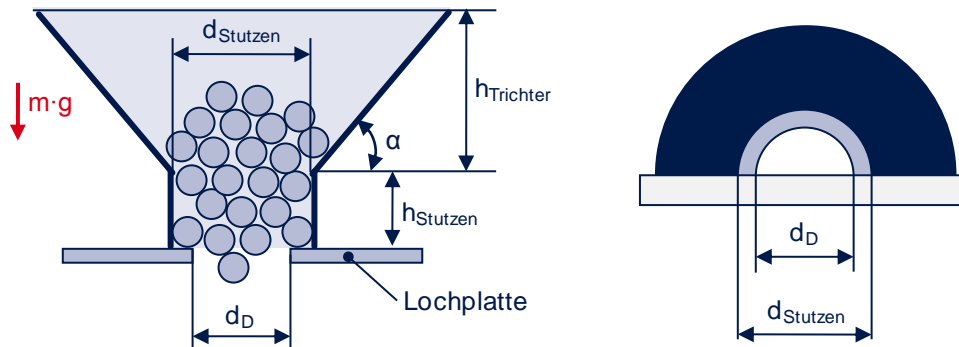


Abbildung 5-4: Konzipierter Flussversuch zur Ermittlung der Massenströme bei sehr kleinen Düsendurchmessern (vgl. DIN ISO 4324 1983)

Über den Trichter, der einen hinreichend steilen Neigungswinkel  $\alpha = 45^\circ$  hat, wird der Stutzen über die gesamte Versuchsdauer mit Schüttgut versorgt. Der Durchmesser  $d_{Stutzen}$  ist konstant und sehr viel größer als der Durchmesser der Pulveraustrittsöffnung  $d_D$ . In obiger Grafik ist  $d_D$  deutlich vergrößert dargestellt. Dadurch wird eine optimale Pulverversorgung gewährleistet (SCHWEDES 1968, KUSCHEL 1998). Um den Grenzbereich des Pulverflusses hinsichtlich der minimal möglichen Düsendurchmesser zu untersuchen, wurde eine austauschbare Lochplatte integriert. Die Größenverhältnisse lassen sich wie folgt darstellen (vgl. Gleichung 5-3):

$$d_{Stutzen} \gg d_D \geq d_K \quad (5-3)$$

Ziel ist es, die Wechselwirkung zwischen  $d_D$  und  $d_K$  zu analysieren und dadurch den Pulverfluss unter Schwerkräfteinfluss für sehr kleine Bohrungen zu bewerten. Hierfür wurde eine Bohrplatte mit 10 Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,5 mm bis 0,05 mm und einer Abstufung von 50  $\mu\text{m}$  aufgebaut, sodass die Abhängigkeit der Fließfähigkeit von den Durchmessern  $d_D$  und  $d_K$  systematisch erforscht werden konnte.

Der Versuchsaufbau wird durch eine Präzisionswaage ergänzt, welche das durch den Trichter geflossene Schüttgut misst. Der Massenstrom  $\dot{m}$  wird dabei aus dem Quotienten der gemessenen Massenänderung  $m$  und der Zeit  $t$  berechnet:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (5-4)$$

Für die Vergleichbarkeit der Massenströme bei unterschiedlichen Düsenquerschnittsflächen  $A_D$  werden diese auf einen einheitlichen Durchmesser bezogen. Dieser bereinigte Massenstrom  $\dot{m}_A$  berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\dot{m}_A = \frac{\dot{m}}{A_D} \quad (5-5)$$

Mit Hilfe dieser Massenströme wurden die in Abschnitt 5.2.1 aufgeführten Materialsysteme untersucht.

### 5.2.3.2 Ergebnisse des Flussversuchs

Es kann beobachtet werden, dass sich die Massenströme mit kleiner werdendem Düsendurchmesser verringern (siehe Abbildung 5-5, links). Die Gegenüberstellung zeigt darüber hinaus auch abweichende mittlere Massenströme der einzelnen Pulverfraktionen.

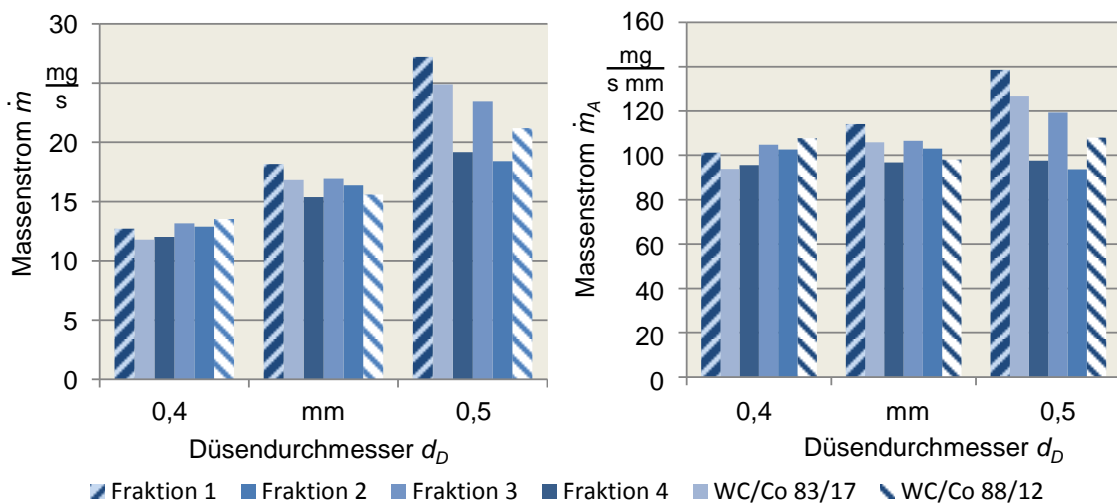


Abbildung 5-5: Gegenüberstellung der erhaltenen Massenströme bei variierenden Düsendurchmessern

Die starken Schwankungen der Ergebnisse des Pulverflussversuchs erfordern eine detaillierte Betrachtung der Korninteraktionen (vgl. Abschnitt 5.2.5).

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

Je kleiner der Düsendurchmesser  $d_D$  ist, desto weniger sind Unterschiede der Massenströme  $\dot{m}$  der verschiedenen Pulver ausgeprägt. Die Berechnung des flächenbezogenen Massenstroms  $\dot{m}_A$  eliminiert den Einfluss der Düsengeometrie und es kann ein pulverspezifischer Wert ermittelt werden. Die Korngrößenverteilung spielt für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eine entscheidende Rolle. Je größer die Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Korndurchmessern ist, desto größer ist die Abweichung vom mittleren Massenstrom. In Abbildung 5-6 werden zwei charakteristische Verläufe des Massenstroms herausgegriffen und erläutert (vgl. auch Anhang Abschnitt 10.2).

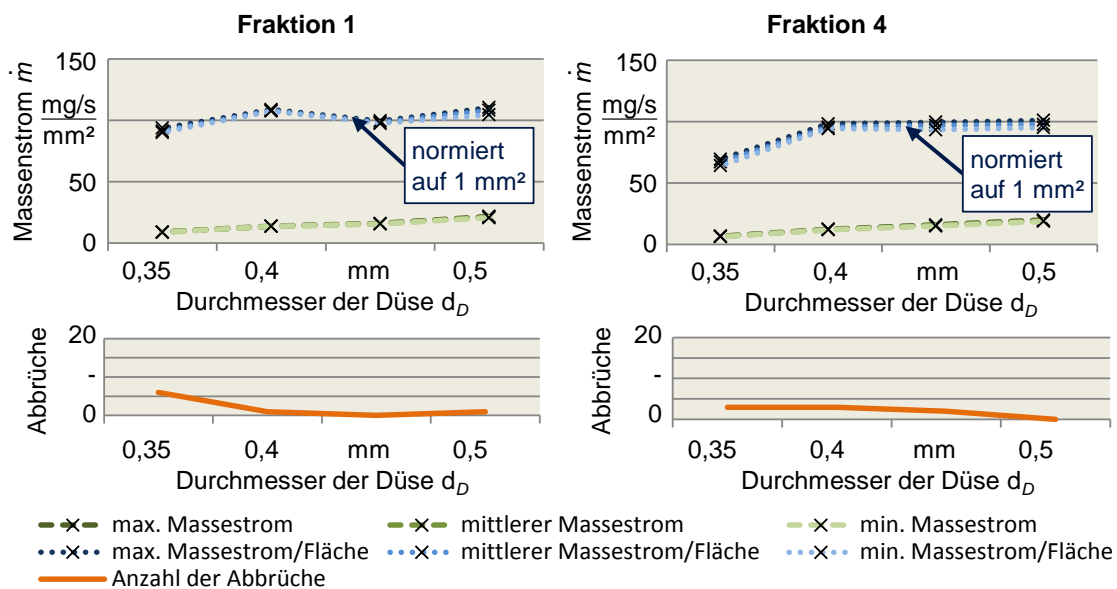


Abbildung 5-6: Charakteristische Verläufe des Pulverflusses sowie der Abbrüche anhand zweier repräsentativer Pulverfraktionen

In beiden Diagrammen weisen die gestrichelten Kurven ( $\dot{m}$ ) einen gleichmäßig steigenden Verlauf auf. Bei Normierung des Massenstroms auf die jeweilige Düsenfläche unterscheiden sich die Fraktionen (gepunkteter Verlauf). Fraktion 1 gibt unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung einen konstanten Verlauf wieder (Abbildung 4-1, links). Im rechten Diagramm (Fraktion 4) hingegen ist ein Abnehmen hin zu kleinen Durchmessern von 0,4 mm und 0,35 mm erkennbar. Je steiler der Abfall der Kurve ist, desto deutlicher kann der kleinste Düsendurchmesser mit den guten Fließeigenschaften aus den Diagrammen abgelesen werden. Während der Versuchsdurchführung lässt sich der Abfall des Massenstroms am pulsierenden Ausfließen des Pulvers erkennen. Das Pulsieren kann sich bis zu einem vollständigen Abreißen des Massenstroms verstärken.

Die Anzahl der Versuchsabbrüche wurde ebenfalls im Diagramm vermerkt. Steigen diese signifikant an, so deutet dies ebenfalls auf einen materialspezifischen, minimalen Düsendurchmesser hin (siehe Abbildung 5-6, links). Der minimal praktikable Durchmesser beträgt 0,4 mm und bestätigt damit andere Forschungsarbeiten, die zu dem Ergebnis gekommen sind, dass der Düsendurchmesser stets ein Vielfaches des Korndurchmessers betragen muss (KRETZLER 2002, FÜTTERER 1991).

### 5.2.4 Korrelation von Scher- und Flussversuch

Der Scherversuch ergab für alle Fraktionen eine sehr hohe Fließfähigkeit (vgl. Abschnitt 5.2.2.2). Die ermittelten Werte  $ff_C$  sind bei allen untersuchten Proben größer als 10, womit sie nach SCHULZE (SCHULZE 2009) als frei fließend klassifiziert werden (siehe Tabelle 5-2, S. 75). Die absolute Differenz zwischen Fraktion 4 ( $ff_C = 16$ ) und den Fraktionen 1 und 3 ( $ff_C = 17$ ) kann mit dem Wert 1 angegeben werden. Der reale Unterschied der ermittelten Fließfähigkeitswerte ist jedoch mit 6 % vernachlässigbar gering, sodass dadurch keine sinnvolle Einteilung der Pulverfraktionen vorgenommen werden kann.

Diese makroskopische Betrachtung des Schüttgutes gilt nur unter der Voraussetzung, dass der Trichter ausreichend geometrisch dimensioniert ist. Das Ziel der Pulverflussbewertung ist es, die Fließfähigkeit von kohäsionslosen Partikelsystemen bei minimalen Durchmessern zu quantifizieren. Der geringe Unterschied der Fließfähigkeitswerte von nur 6 % macht eine mikroskopische Betrachtung des Massenstromes unumgänglich. Die Messmenge der Scherzelle muss sehr viel größer sein als die spätere im Prozess dosierte Pulvermenge (KRETZLER 2002). Deshalb kann das Ergebnis der Scherzelle nur als Anhaltspunkt für die Eigenschaften der Partikelsysteme dienen. Mit geringer werdenden Differenzen zwischen den charakteristischen Größen des Trichters (z. B. Düsendurchmesser) sowie des Schüttgutes (z. B. Korndurchmesser) sind die interpartikulären Wechselwirkungen sowie die Interaktion zwischen Korn und Trichter zunehmend von Bedeutung (LANGSTON ET AL. 1995, SCHWEDES 1968). Es ist somit erforderlich, auf Grundlage des Flussversuchs diese Interaktionen im Detail zu analysieren.

### 5.2.5 Modellbildung und Ergebnisinterpretation

#### 5.2.5.1 Modellbildung

Basierend auf den Resultaten aus den durchgeführten Versuchen können Modelle zur Betrachtung der Pulverkornwechselwirkungen abgeleitet werden. Diese wiederum ermöglichen eine fundierte Interpretation der erzielten Ergebnisse.

Partikelsysteme können unter definierten Rahmenbedingungen als ein Kontinuum beschrieben werden (siehe Abbildung 5-7). Dabei müssen die Pulverkörner bzw. das Schüttgutelement sehr viel kleiner als die geometrischen Größen des Trichters (z. B. Düsendurchmesser) sein. Da der mittlere Korndurchmesser ( $\approx 40 \mu\text{m}$ ) sowie der minimal notwendige Düsendurchmesser ( $< 500 \mu\text{m}$ ) in einer Größenordnung liegen, muss das Pulverkontinuum in die einzelnen Pulverkörner aufgegliedert werden. Die nähere Betrachtung des Schüttgutelements lässt, wie in Abbildung 5-7 rechts dargestellt, die einzelnen Pulverpartikel erkennen.

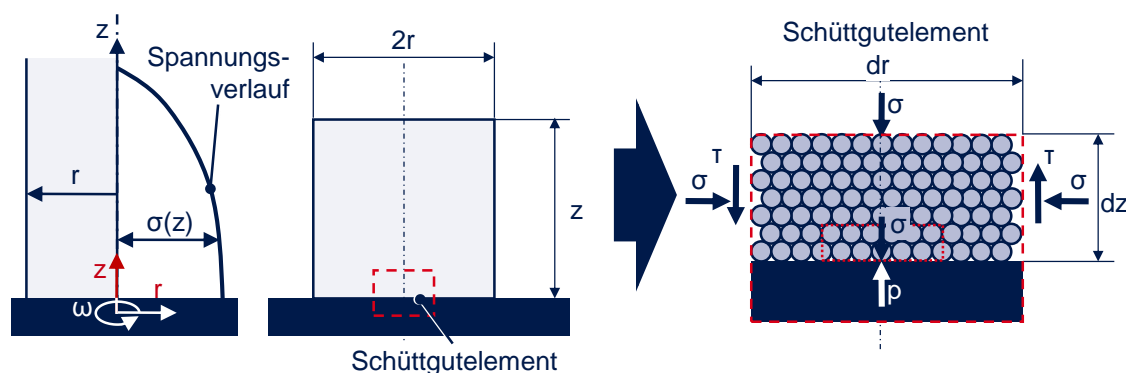


Abbildung 5-7: Spannungsverlauf in einem homogenen, zylindrischen Behälter sowie ein Schüttgutelement mit den wirkenden Spannungen (vgl. DIN 1055, Teil 6 2005, Schulze 1991)

Das obige Bild enthält einige Vereinfachungen, wie zum Beispiel dass das Pulver eine ideale, maximale Schüttdichte besitzt. Weiterhin werden die enthaltenen Partikel mit Kugelform mit einem einheitlichen Korndurchmesser angenommen. Im Abschnitt 5.2.5.2 wird der Einfluss des Korndurchmessers im Detail betrachtet. Die Spannung im rechts dargestellten Schüttgutelement kann, aufgrund der vorhandenen Wandreibung und der geringen Ausdehnung des Schüttgutelements, als näherungsweise konstant angenommen werden (DIN 1055, TEIL 6 2005).



Wie aus TOMAS (TOMAS 2009) bekannt ist, treten Pulverkörner durch verschiedene Haftkräfte (z. B. Van-der-Waals) in Wechselwirkung. Aufbauend auf dieser Erkenntnis können die Einzelkorninteraktionen näher analysiert werden. Unter der Randbedingung, dass die einzelnen Körner eine 100-prozentige Dichte und eine homogene Materialzusammensetzung haben, besitzen diese durch ihre chemische Zusammensetzung eine mittlere Dichte von  $16,70 \text{ g/cm}^3$  (siehe Tabelle 5-3).

*Tabelle 5-3: Theoretisch berechnete Dichte eines Pulverkornes auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung*

Material	W	C	Co	Fe
Dichte $\rho$ [ $\text{g/cm}^3$ ]	19,30	3,51	8,90	7,87
Verteilung WC/Co von 83/17 [%]	77,68	5,11	17,16	0,05
Mittlere Dichte $\rho$ [ $\text{g/cm}^3$ ]	<b>16,70</b>			

Für die Bestimmung der Haftkräfte einzelner Körner können verschiedene Messverfahren verwendet werden (HAACK 1974). Ein Vergleich zwischen der Gewichtskraft und der Haftkraft lässt erkennen, dass mit zunehmendem Korndurchmesser die Gewichtskraft überproportional gegenüber der Haftkraft zunimmt. Diese Erkenntnisse sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst.

*Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der Gewichtskraft und Haftkraft in Abhängigkeit vom Kornradius  $r$  für WC/Co 83/17*

Radius $r$ [ $\mu\text{m}$ ]	Volumen $V$ [ $10^{-9} \text{cm}^3$ ]	Masse $m$ [ $10^{-10} \text{kg}$ ]	Gewichtskraft $F_G$ [ $10^{-10} \text{N}$ ]	Haftkraft $F_H$ [ $10^{-6} \text{N}$ ]	$F_H/F_G$
7,5	1,77	1,12	10,98	~6,5	592
25,0	65,45	41,44	406,53	~18,8	46
31,5	130,92	82,89	813,15	~59,9	73
40,0	268,08	169,72	1664,98	~78,8	47

In oben dargestellter Tabelle wurden die maximal auftretenden Haftkräfte (Idealzustand) ermittelt (RUMPF 1990). In der Realität werden die Haftkräfte der Partikelsysteme durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst bzw. deutlich vermindert (vgl. Abschnitt 2.4.4). Unter der Annahme, dass der Einfluss der Luftfeuchtigkeit, die für die Ausbildung von Flüssigkeitsbrückenbindungen verantwortlich ist, vernachlässigt wird, repräsentiert die Van-der-Waals-Kraft die wichtigste Partikelhaftkraft. Deren Höhe ist abhängig von der Oberfläche sowie der Entfer-

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

nung der interagierenden Körner voneinander (siehe Abbildung 2-11, S. 22). Bei sehr kleinen Korndurchmessern dominiert die Haftkraft gegenüber der Gewichtskraft. Mit zunehmendem Durchmesser des Partikels reduziert sich der Einfluss der Haftkraft (siehe Tabelle 5-4).

Aus bereits vorangegangenen Untersuchungen (SCHWEDES 1968, WITTMAYER 2003) ist bekannt, dass Brückenbildung eine wesentliche Ursache für reduzierten bzw. nicht existenten Massenfluss darstellt. Im Folgenden soll der Zustand, bei dem gerade kein Pulver mehr fließt, betrachtet werden ( $\vec{v}_K = 0$ ). Hierzu ist es erforderlich, die Einzelkorninteraktionen in der Brückenkonstellation zu analysieren. Durch die gleichbleibende Querschnittsfläche der Düse  $A$  kann die vorliegende Spannung  $\sigma$  als proportional zur resultierenden, von außen wirkenden Kraft  $F$  angesehen werden (vgl. Gleichung 5-6):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5-6)$$

Wird die Kornbrücke frei geschnitten, so können, wie in Abbildung 5-8 dargestellt, 3 resultierende Kraftangriffspunkte, ein vertikaler sowie zwei seitliche, gefunden werden.

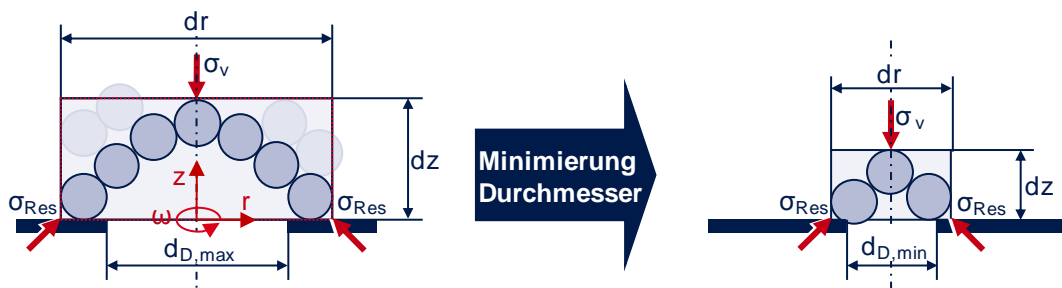


Abbildung 5-8: Reduzierung des Betrachtungsraums „Düsenöffnung“ auf einzelne Körner für eine detaillierte Analyse der Einzelkorninteraktionen

Durch die symmetrische Gestaltung der Pulverdüse ist die Kraftverteilung im Pulversystem ebenfalls als symmetrisch anzusehen (FÜTTERER 1991). Für die weitere Betrachtung kommt sowohl den Wechselwirkungen zwischen den Partikeln als auch zwischen Wand und Partikeln eine entscheidende Bedeutung zu. Das zu lösende Spannungsfeld ergibt sich deshalb aus den Interaktionen der Partikel mit der Düsengeometrie. Beides soll in den beiden folgenden Abschnitten untersucht werden.

### 5.2.5.2 Einfluss des Partikelsystems

Wird ein Partikelsystem mit definierten Korndurchmessern betrachtet, so lassen sich die resultierenden Interaktionen unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen beschreiben:

- Zweidimensionale Betrachtung der Partikelsysteme
- Idealisierte Darstellung der Partikel als reibungsfreie Kugeln
- Annahme einer dichtesten Kugelpackung
- Definition einheitlicher Korngrößen

Die Anzahl  $m$  der Interaktionen eines Pulverkorns mit den umgebenden Körnern wird näherungsweise durch das Radienverhältnis bestimmt (Gleichung 5-7):

$$m = \frac{r_i + r_a}{r_a} \cdot \pi \quad (5-7)$$

Dabei wird das sich im Zentrum befindende Korn mit dem Radius  $r_i$  bezeichnet, die radial um die mittige Kugel angeordneten Körner besitzen jeweils den Radius  $r_a$ . Wird der Kornradius  $r_i$  als konstant definiert, so nimmt die Zahl der umgebenden Körner mit geringer werdendem Radius  $r_a$  zu.

Reale Partikelsysteme werden jedoch über eine Korngrößenverteilung definiert, welche sich über sehr viele verschiedene Kornradien erstrecken kann (vgl. Abschnitt 5.2.1). Findet diese Verteilung Berücksichtigung, so muss oben aufgestellte Gleichung durch das arithmetische Mittel der äußeren Pulverkornradien ergänzt werden (Gleichung 5-8):

$$m = \frac{r_i + \bar{r}_a}{\bar{r}_a} \cdot \pi = \frac{r_i + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{a,j}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{a,j}} \cdot \pi \quad (5-8)$$

Da jedes Korn mit den umliegenden Körnern interagiert (TOMAS 1990, TOMAS 2009), ist die Anzahl der Wechselwirkungen für die Fließfähigkeit von Bedeutung. Je geringer der Abstand der Körner zueinander ist, desto stärker befinden sich diese im gegenseitigen Wirkungsbereich (HAACK 1974, SCHULZE 2009). Wird das Pulver verdichtet, so verstärken sich die Haftkräfte.

Neben der Schüttdichte und den sich daraus ergebenden Einzelkorninteraktionen ist der Radius der Kornfraktion eine wichtige Größe für die Beurteilung der Fließfähigkeit. Ein konstantes Radienverhältnis  $r_i$  zu  $r_a$  führt zu einer konstanten Anzahl an maximal möglichen Kugelkontakten und damit zu einer definierten Interaktion. Der Korndurchmesser ( $2r_i$ ) bestimmt jedoch das Verhältnis der Haftkraft  $F_H$  (HAMAKER 1937, JOHNSON 1998, LEE-DESAUTELS 2005) zur Ge-

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

---

wichtskraft  $F_G$  jeder einzelnen Kugel. Beide Kräfte können durch folgende Gleichungen ausgedrückt werden ( $F_H$  vgl. LEE-DESAUTELS 2005):

$$F_H = \frac{A_{12}}{6 \cdot s^2} \left( \frac{r_i r_a}{r_i + r_a} \right) \quad (5-9)$$

$$F_G = \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot r_i^3 \cdot \pi \quad (5-10)$$

Die Haftkraft  $F_H$  setzt sich dabei aus dem materialspezifischen Hamaker-Koeffizienten  $A_{12}$ , dem Partikelabstand  $s$  sowie den Kornradien ( $r_i, r_a$ ) zusammen (HAMAKER 1937). Die Gewichtskraft  $F_G$  wird aus der Festkörperdichte  $\rho$ , der Erdbeschleunigung  $g$  sowie dem Kugelvolumen berechnet. Beide Kräfte steigen mit zunehmendem Radius. Aus dem gebildeten Quotienten aus Haft- und Gewichtskraft lässt sich eine überproportionale Zunahme der Gewichtskraft erkennen (vgl. Gleichung 5-11).

$$\frac{F_H}{F_G} = \frac{3 \cdot A_{12}}{8 \cdot \rho \cdot g \cdot r_i^3 \cdot \pi \cdot s^2} \left( \frac{r_i r_a}{r_i + r_a} \right) \quad (5-11)$$

Die Fließfähigkeit des Pulvers ist somit sowohl von der Schüttdichte, welche die Anzahl der Korninteraktionen und damit die Intensität der Kräfteinteraktion festlegt, als auch von der Korngröße des Partikelsystems, welches sich durch das Verhältnis von Haft- zu Gewichtskraft definiert, abhängig.

### 5.2.5.3 Einfluss des Düsendurchmessers

Für die Betrachtung des Düsendurchmessers wird die Pulverfraktion als konstant angenommen. Es wird lediglich der Düsendurchmesser variiert. Deshalb kann das in Abschnitt 5.2.5.2 definierte Verhältnis von  $F_H/F_G$  als konstant angenommen werden.

Bei der Analyse der Düse hilft die Scheibenelementmethode nach JANSSEN (JANSSEN 1895), deren Gültigkeit bereits mehrfach für die Auslegung von Silos unter Beweis gestellt wurde (FRANKEN & MARTENS 1988, HAMPE 1987, PIEPER & WENZEL 1994).

Unter der Annahme einer konstanten Spannung  $\sigma_v$  über den Düsenquerschnitt ( $2r$ ) und konstanter Schüttgutdichte  $\rho_b$  kann folgendes Kräftegleichgewicht (vgl. Gleichung 5-12 und 5-13) in z-Richtung aufgestellt werden (siehe Abbildung 5-9):

$$A\sigma_v + g\rho_b A dz = A(\sigma_v + d\sigma_v) + \tau_w U dz \quad (5-12)$$

mit  $A = r^2\pi$  und  $U = 2r\pi$  (5-13)

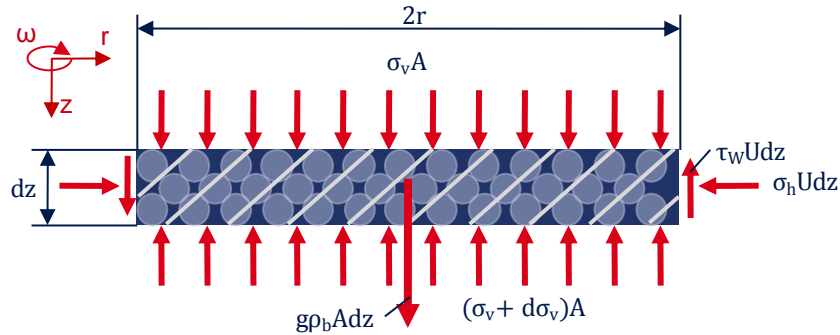


Abbildung 5-9: Scheibenelement im Trichter mit vertikalen Wänden

Wird das Kräftegleichgewicht mit dem Wandreibungswinkel  $\varphi$  sowie dem Horizontallastverhältnis  $\lambda$  (Gleichung 5-14 und Gleichung 2-4) ergänzt, kann eine gewöhnliche Differentialgleichung für die Vertikalspannung  $\sigma_v$  aufgestellt werden.

$$\tan \varphi = \frac{\tau_w}{\sigma_h} \quad (5-14)$$

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \sigma_v \lambda \frac{U}{A} \tan \varphi = g \rho_b \quad (5-15)$$

Unter Berücksichtigung der Randbedingung, dass die Vertikalspannung bei  $z = 0$  gleich  $\sigma_{v0}$  ist, folgt bei der Integration der Differentialgleichung:

$$\sigma_v = \frac{g \rho_b A}{\lambda \tan \varphi U} + \left\{ \sigma_{v0} - \frac{g \rho_b A}{\lambda \tan \varphi U} \right\} \cdot e^{-\frac{\lambda \tan \varphi U z}{A}} \quad (5-16)$$

Wird angenommen, dass die Spannung  $\sigma_{v0}$  an der Schüttgutoberfläche ( $z = 0$ ) gleich Null ist, folgt:

$$\sigma_v = \frac{g \rho_b A}{\lambda \tan \varphi U} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\lambda \tan \varphi U z}{A}} \right\} = \frac{g \rho_b d}{4 \lambda \tan \varphi} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\lambda \tan \varphi U z}{A}} \right\} \quad (5-17)$$

Mit zunehmenden  $z$ -Werten strebt die  $e$ -Funktion gegen Null. Damit ist der Ausdruck vor der Klammer der Grenzwert von  $\sigma_v$ . Obige Gleichung bestätigt, dass die vorherrschende Spannung als quasi unabhängig von der Düsenhöhe angenommen werden kann, weil ausreichend hohe Werte für  $z$  gegeben sind. Der Grenzwert hängt vom Verhältnis der Querschnittsfläche  $A$  zum Umfang  $U$  ab (SCHULZE 1991). Es kann damit veranschaulicht werden, dass die für den Pulverfluss verantwortliche Spannung  $\sigma_v$  proportional zum Düsendurchmesser ist (JENIKE A. W. 1964, MOLERUS 1985, SCHULZE 1991). Je kleiner der Durchmesser wird, desto geringer sind die dort vorliegenden Spannungen (WITTMAYER 2003).

### 5.2.5.4 Schlussfolgerung aus der Betrachtung der Partikelsysteme und der Düsendurchmesser

Die Fließfähigkeit von Schüttgütern ist eine komplexe Eigenschaft, die sich aus den Pulvereigenschaften und der Düsengeometrie zusammensetzt. Wichtig ist die Auswahl einer passenden Pulverfraktion. Dabei spielt sowohl die absolute Korngröße als auch die Korngrößenverteilung eine fundamentale Rolle. Entscheidenden Einfluss hat dabei das Kräfteverhältnis  $F_H/F_G$  (Gleichung 5-11).

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass bei hohen Werten für  $z$  nur das Verhältnis von Düsenfläche  $A$  zu Düsenumfang  $U$  für die Fließfähigkeit entscheidend ist. Es konnte verdeutlicht werden, dass kleiner werdende Düsendurchmesser die vertikal wirkende Spannung  $\sigma_v$  in der Düse vermindern. Somit wird der Pulverfluss bei minimalen Düsendurchmessern nicht geometrisch durch die Korndurchmesser ( $d_K < d_D$ ), sondern durch die interpartikulären Wechselwirkungen ( $F_H < F_G$ ) beschränkt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen gilt es, eine Pulverdüse für das selektive Pulverauftragen zu entwickeln.

## 5.3 Gestaltung des Auftragsmechanismus

Die Bauteilqualität der strahlgeschmolzenen Strukturen ist sehr eng an die Genauigkeit beim Pulverauftragen gekoppelt (vgl. Gleichung 4-3 in Abschnitt 4.4.3). Darüber hinaus müssen die pulverspezifischen Charakteristika (vgl. Abschnitt 5.2) bei der Gestaltung des Auftragsmechanismus berücksichtigt werden. Der selektive Pulverauftrag stellt deshalb die wichtigste Komponente für die Multimaterialfertigung dar. Es muss auf der einen Seite eine hohe Robustheit des Subprozesses „Selektiver Pulverauftrag“ gewährleistet sein, ohne dabei auf der anderen Seite zu große Beeinträchtigungen bei der Präzision des Pulverauftrags hinnehmen zu müssen. Aufbauend auf den durchgeführten Flussversuchen wurde nachfolgend dargestelltes Dosierungsprinzip erforscht (siehe Abbildung 5-10).

Durch die Festlegung des charakteristischen minimalen Durchmessers  $d_B = 0,4 \text{ mm}$  (vgl. Abschnitt 5.2.3.2) kann der Pulverfluss sichergestellt werden. Dieser Wert ist pulverspezifisch und wurde hier für den Werkstoff WC/Co 83/17 festgelegt. Da der darunterliegende Durchmesser ( $d_A$ ) größer ist als  $d_B$ , muss  $d_A$  für den Pulverfluss nicht weiter betrachtet werden. Das Auftragsprinzip basiert auf den selbstfließenden Eigenschaften des kohäsionslosen Pulvers (1). Dieses fließt durch das Langloch des Abstreifers (2) bis in eine der 20 Bohrungen der

### 5.3 Gestaltung des Auftragsmechanismus

Dosierscheibe (3), welche darin mit einem Winkel von jeweils  $18^\circ$  gleichmäßig über den Umfang verteilt sind. Der Wert des Winkels ist ein Vielfaches der minimalen Schrittmotorweite (Schrittweite  $1,8^\circ$ ), welcher als Antriebseinheit für die Dosierung dient. Wird die Dosierscheibe über einen angeschlossenen Schrittmotor gedreht, kann kein weiteres Pulver in die Bohrung fließen und ein abgeschlossenes Volumen  $V_B$  liegt vor. Die Pulveraufnahme ist damit abgeschlossen.

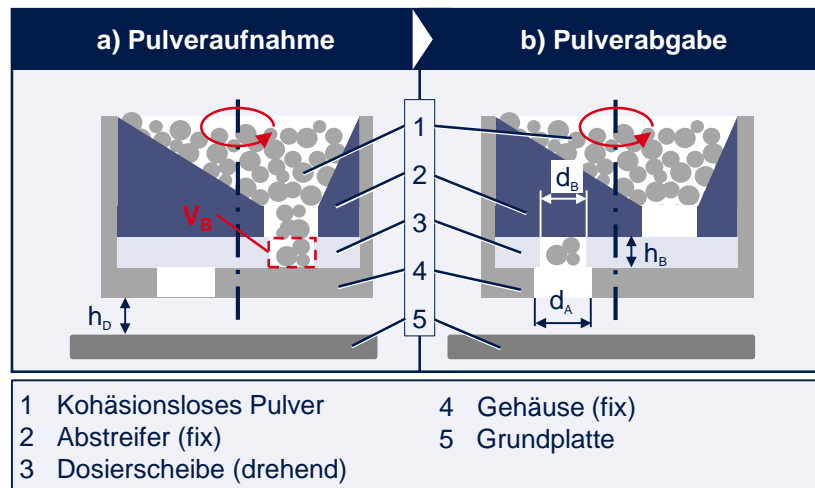


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung des Auftragsmechanismus zum selektiven Pulverauftrag für a) Pulveraufnahme und b) Pulverabgabe

Wird die Bohrung weiter gedreht, so kommt diese bündig über der Auslassbohrung  $d_A$  zu liegen, welche in das Gehäuse (4) eingearbeitet ist. Diese ist die einzige Bohrung, durch welche das Pulver an die darunter liegende Grundplatte (5) abgegeben werden kann und bildet dadurch die Schnittstelle in den Prozessraum. Die Pulverabgabe erfolgt somit in einzelnen, diskreten und abgeschlossenen Pulverportionen.

Oben beschriebenes Auftragsprinzip wurde in einen Prototypenaufbau konstruktiv umgesetzt (siehe Abbildung 5-11).

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

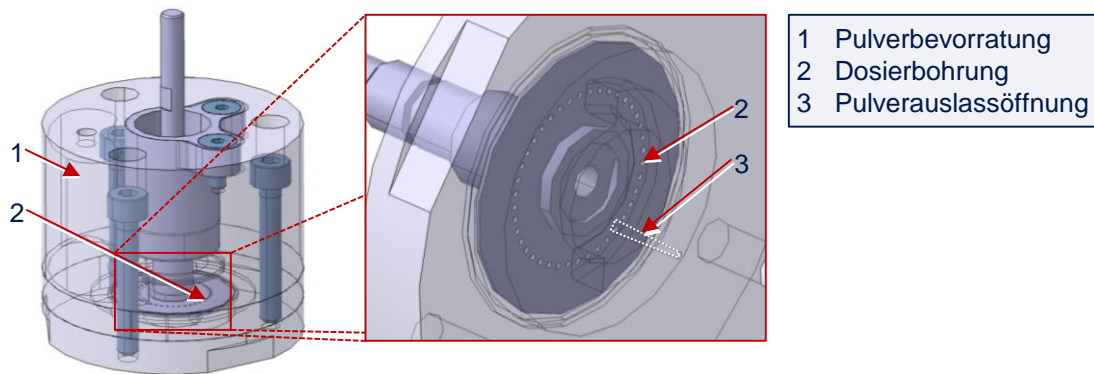


Abbildung 5-11: Konstruktion des umgesetzten Auftragsmechanismus

Dieser Aufbau enthält eine Pulverbevorratung (1) sowie die oben erwähnte Dosierscheibe (2) mit den Dosierbohrungen. Auf der Unterseite der Dosierscheibe schließt sich die Pulverauslassöffnung (3) an, welche hier zur Verdeutlichung punktiert dargestellt ist. Der abgebildete Auftragsmechanismus wird im Folgenden in zwei Schritten hinsichtlich der Praxistauglichkeit verifiziert. Zuerst wurden dazu einzelne Pulvervolumina abgegeben und anschließend anhand der Dimensionen auf der Grundplatte charakterisiert. Im zweiten Schritt wurden Pulverbahnen mit einer Länge  $l = 20 \text{ mm}$  aufgetragen und deren Durchgängigkeit bewertet.

Vor Beginn der experimentellen Validierung war es förderlich, das Volumen einer Pulverdosierung der Dosierbohrung zu bestimmen, um die experimentellen Ergebnisse zu verifizieren. Das aufgetragene Pulver kann näherungsweise durch einen Kegel beschrieben werden (vgl. Abbildung 4-6, S. 58). Der theoretische Durchmesser eines abgegebenen Pulvervolumens  $d_{p,theo}$  kann aus dem Volumen  $V_B$  mit den Abmessungen  $d_B = 0,4 \text{ mm}$  und  $h_B = 0,3 \text{ mm}$  und unter Berücksichtigung der vorgegebenen Höhe  $h_D$  berechnet werden (vgl. Gleichung 5-18):

$$d_{p,theo} = 2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot V_B}{\pi \cdot h_D}} \quad (5-18)$$

Neben den theoretischen Durchmessern können auch die validierten Parameter sowie die erzielten Resultate der nachstehenden Tabelle (siehe Tabelle 5-5) entnommen werden.

Im Rahmen der ersten Validierung wurde die Prozessrobustheit bei 100 Pulverabgaben getestet. Das arithmetische Mittel der Masse der Pulverportionen kann mit  $0,45 \text{ mg}$  bei einer maximal auftretenden Schwankungsbreite von  $0,02 \text{ mg}$  angegeben werden. Basierend auf diesen Ergebnissen gilt es die notwendigen Parameter für die selektive Pulverabgabe zu bestimmen.



Es wurde die Breite bzw. die Höhe der Pulverabgaben quantitativ bzw. qualitativ charakterisiert (siehe Tabelle 5-5). Für die qualitative Bewertung wurden folgende Bewertungsklassen gewählt, um die Form bzw. die Höhe der Pulverabgaben zu bewerten:

- ++: sehr stumpfer Kegel bis Zylinder ( $h_p \leq h_D$ )
- +: stumpfer Kegel ( $h_p \leq h_D$ )
- o: Kegel ( $h_p = h_D$ )
- -: Kegel ( $h_p > h_D$ )
- --: Kegel ( $h_p \gg h_D$ )

Für eine Höhe von 50  $\mu\text{m}$  weichen die Durchmesser  $d_{p,theo}$  und  $d_p$  stark voneinander ab. Diese Differenz der Pulvervolumina wird im Experiment durch Pulververwischungen verdeutlicht, die die Auftragsgenauigkeit reduzieren und im Durchmesser  $d_p$  berücksichtigt werden. Mit zunehmender Höhe  $h_D$  werden die Verwischungen verringert. Für den linearen Pulverauftrag wird die Höhe von 50  $\mu\text{m}$  nicht weiter berücksichtigt. Die Auftragshöhe von 100  $\mu\text{m}$  konnte als Optimum für die vorgegebene Pulverdosierung ermittelt werden.

*Tabelle 5-5: Ergebnisse der einzeln aufgetragenen Pulvervolumina*

Höhe $h_D$ [mm]	$d_{p,theo}$ [mm]	Schritte [-]	$d_p$ [mm]	$h_p$ [-]
0,05	1,7	10	0,9	++
		15	1,1	++
0,10	1,2	10	0,9	++
		15	1,2	+
		20	1,3	o
		25	1,3	o
		30	1,4	-
0,15	1,0	10	1,1	++
		15	1,2	+
		20	1,3	o
		25	1,4	-
		30	1,5	--

Die in Abschnitt 4.4.3 postulierte These, dass mit zunehmender Höhe  $h_D$  der Durchmesser des Pulvers  $d_p$  steigt, kann damit bewiesen werden.

Für die Erzeugung von zusammenhängenden Pulverbahnen ist die Maschenweite des Gitters  $a_{p,theo}$  entscheidend (vgl. Abschnitt 4.4.2). Diese kann in Abhängig-

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

keit von der minimalen Höhe  $h_{min}$  der sich überlappenden Pulverdosierungen angegeben werden (vgl. Gleichung 5-19).

$$a_{P,theo} = d_P - \frac{2 \cdot (1 - \frac{h_{min}}{h_{D,max}})}{\sqrt{3}} \cdot h_{D,max} \quad (5-19)$$

Die theoretische Maschenweite der Pulvervolumina  $a_{P,theo}$  berechnet sich aus dem Durchmesser  $d_P$  der Pulverabgaben sowie einer maximalen Schwankungsbreite (hier: 10 %) entlang der aufgetragenen Pulverspur. Durch die Definition einer minimal zulässigen Höhe  $h_{min}$  (hier: 90 % von  $h_{D,max}$ ), bei welcher der minimale Korndurchmesser mit einbezogen wurde, wird diese Schwankungsbreite berücksichtigt, sodass eine durchgängige Bahn erzeugt werden kann. In die Variable  $h_{min}$  fließen die minimalen Korndurchmesser und die Pulverfraktion ein, sodass keine Unterbrechungen auftreten.

Die Bewertung der Durchgängigkeit (Unterbrechungsfreiheit bzw. Stetigkeit der Schichtkontur) der Pulverspur erfolgt anhand nachstehender qualitativer Einteilung (vgl. Tabelle 5-6):

- ++: keine Schwankungen in der Breite feststellbar
- +: leichte Schwankungen in der Breite
- -: geringe Verbindung der Pulverdosierungen
- --: keine zusammenhängende Bahn

Tabelle 5-6: Qualität der erzeugten Pulverbahnen

Höhe $h_D$ [mm]	Schritte [-]	$a_{P,theo}$ [mm]	$a_P$ [mm]	$d_P$ [mm]	$h_P$ [-]	Durchgängigkeit [-]
0,1	15	1,1	0,1	(1,2)*	++	-
		1,1	0,2	(1,2)*	++	-
	20	1,2	0,2	(1,3)*	+	-
		1,2	0,3	(1,3)*	+	-
	25	1,6	0,2	1,75	-	++
		1,2	0,3	1,35	-	+
	30	2,1	0,2	2,25	--	++
		1,9	0,3	2	-	+
0,15	15	1,0	0,2	(1,2)*	--	-
	20	1,3 (1,4)	0,15 (0,2)	1,45 (1,6)	--	-
	25	1,6 (1,4)	0,2 (0,25)	1,8 (1,6)	--	-
	30	1,5 (1,3)	0,25 (0,3)	1,7 (1,5)	--	-

Bei der Validierung der Pulverbahn hinsichtlich Durchgängigkeit und Höhe weichen  $a_{p,theo}$  und  $a_p$  stark voneinander ab. Dies ist bedingt durch die hohe Fließfähigkeit des ausgewählten Hartstoffpulvers (WC/Co 83/17). Darauf ist auch eine zu beobachtende Unschärfe der aufgetragenen Spur zurückzuführen. Die betreffenden Parameter wurden in Tabelle 5-6 mit einem „\*“ gekennzeichnet.

Für eine gleichmäßige Kontur sind die Gitterabstände sehr klein zu wählen. Mit größer werdendem Gitterabstand können die einzelnen Pulvervolumina identifiziert werden (vgl. Tabelle 5-6 Durchgängigkeit „-,“). Es konnte folgende Parameterkonfiguration als Optimum ermittelt werden:

- Auftragshöhe  $h_D = 0,1 \text{ mm}$
- Maschenweite  $a_p = 0,2 \text{ mm}$
- Schrittzahl von 25 (entspricht  $45^\circ$  und dem Volumen von durchschnittlich 2,5 Dosierbohrungen)

Die Hauptursache für den Pulverdurchmesser  $d_p = 1,75 \text{ mm}$  ist in der sehr geringen Höhe bei additiven Prozessen zu finden. Hierbei ist ein Kompromiss aus Auftragsgenauigkeit und Qualität des späteren Bauteils zu wählen. Den validierten Auftragsmechanismus gilt es nun in den additiven Prozess zu integrieren.

## 5.4 Systementwicklung und Optimierung

Die Kombination des selektiven und des flächigen Pulverauftrags wird in nachfolgender Abbildung 5-12 dargestellt. Das selektive Auftragsmodul (1) ist auf einer Linearachse (2) montiert, welche dafür sorgt, dass an jedem Punkt der Prozessebene Hartstoffpulver bereitgestellt werden kann. Der Auftragsmechanismus wird durch zwei Klingen ergänzt. Zum einen wurde eine Pulvernivellierungsklinge (3), welche den Bauprozess für den selektiven Pulverauftrag vorbereitet, hinzugefügt. Zum anderen ist die Auftragsklinge für das Substratpulver (4) dargestellt. Diese füllt nach Abschluss des selektiven Pulverauftrags und der anschließenden Verfestigung die Prozessebene mit dem Substratwerkstoff auf (vgl. OTT 2011).

## 5 Fließfähigkeitsbewertung

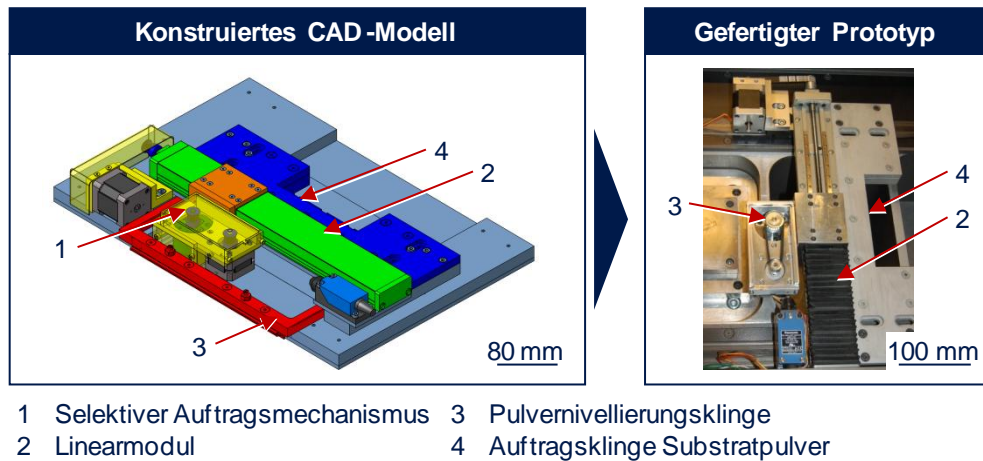


Abbildung 5-12: Darstellung des konstruierten und gefertigten Auftragsmoduls

Der Prozess wurde, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, ausgeführt. Dabei konnten nachfolgend aufgezeigte Zwischenergebnisse (siehe Abbildung 5-13) für die Teilprozesse „selektiver Pulverauftrag der Beschichtung“ (1), „selektives Belichten der Beschichtung“ (2), „flächiger Pulverauftrag des Substrates“ (3) und „selektives Belichten des Substrates“ (4) ermittelt werden.

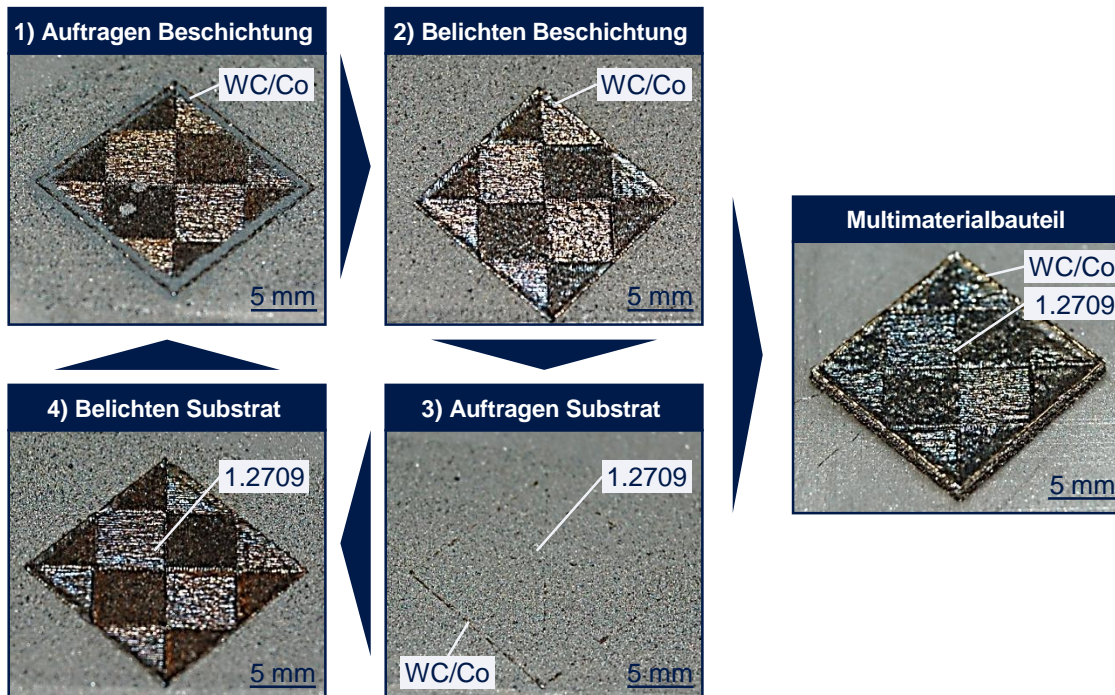


Abbildung 5-13: Ergebnisse der Subprozesse anhand eines einfachen Multimaterialbauteils

Anhand eines einfachen Quaders mit einer Hartstoffbeschichtung (WC/Co) an der äußeren Kontur (siehe Abbildung 2-4, S 13) und der Verwendung des Warm-

arbeitsstahls 1.2709 im Bauteilinneren konnte die Prozesseignung des Auftragsmoduls und des Algorithmus dargelegt werden.

### **5.5 Zusammenfassung**

Das in Kapitel 4 aufgestellte Prozessmodell des Pulverauftrags wurde in Kapitel 5 für die Erforschung des selektiven Auftragsprinzips wieder aufgegriffen. Dazu wurden die Pulverwerkstoffe, die für den späteren additiven, strahl- und pulverbettbasierten Fertigungsprozess eingesetzt werden sollen, eingeführt (vgl. Abschnitt 5.2.1) und hinsichtlich ihres Spannungszustandes (vgl. Abschnitt 5.2.2) sowie ihrer Fließfähigkeit (vgl. Abschnitt 5.2.3) untersucht. Die Ergebnisse aus den Experimenten wurden mit theoretischen Modellen hinterlegt (vgl. Abschnitt 5.2.5) und sind in die Entwicklung des Prototyps für den selektiven Pulverauftrag eingeflossen (vgl. Abschnitt 5.3). Aufbauend auf dem validierten Prozessablauf (vgl. Abschnitt 5.4) werden in Kapitel 6 die Eigenschaften des additiven Fertigungsprozesses sowie der Materialien charakterisiert.



## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

### 6.1 Werkstoffqualifizierung

#### 6.1.1 Einfluss der Laserstrahlung

Die Laserstrahlung ist der meist verwendete Energieträger für den Strahlschmelzprozess. Deshalb wird die Strahl-Stoff-Wechselwirkung, im Speziellen der Absorptionskoeffizient  $\eta_{abs}$  für die Wellenlänge  $\lambda_L = 1064 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ , hier charakterisiert (vgl. Gleichung 6-1). Er ist folgendermaßen definiert:

$$\eta_A = \frac{E_A}{E_L} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{P_L \cdot t} \quad (6-1)$$

Durch den Werkstoffwechsel im Multimaterialbauteil absorbiert das Material den Laserstrahl unterschiedlich. Um den Anteil der absorbierten thermischen Energie  $E_A$  zu ermitteln, wurde der Versuchsaufbau aus Abbildung 6-1 gewählt. Dabei wird eine Probe mit definierter Masse  $m$  und spezifischer Wärmekapazität  $c_p$  (Pulver, Festkörper) mittels Laserstrahlung erhitzt. Die daraus resultierende Temperaturänderung  $\Delta T$  (siehe Abbildung 6-1, rechts) wird mit Thermoelementen gemessen und aufgezeichnet. Der vorliegende Absorptionskoeffizient  $\eta_A$  kann durch die Gleichung 6-1 bestimmt werden.

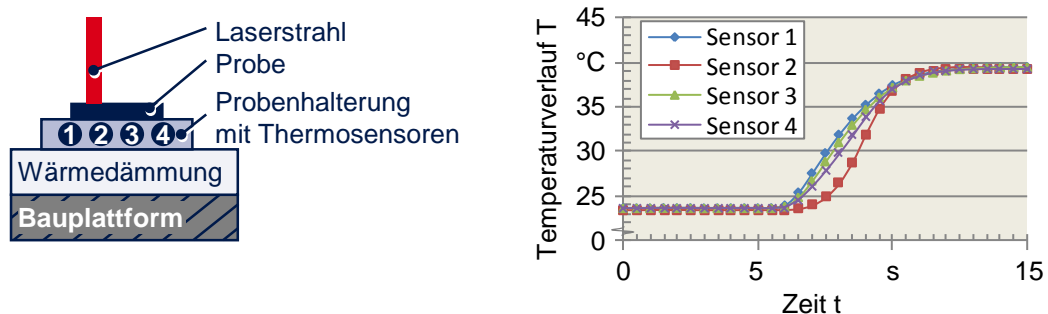


Abbildung 6-1: Versuchskonfiguration zur Messung des Absorptionskoeffizienten sowie ein exemplarischer, gemessener Temperaturverlauf

Die Temperaturdifferenz wird nach der Homogenisierung des Wärmeeintrags, d. h. bei einheitlichen Temperaturniveaus an allen Thermosensoren, abgelesen. Mit dieser Versuchskonfiguration wurden sowohl Oberflächeneigenschaften

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

(matt – glänzend; erodiert – generiert) als auch Ausgangsmaterialien (Festkörper, Pulver) untersucht. Die ermittelten Absorptionsgrade für den Stahl und das Hartmetall können Abbildung 6-2 entnommen werden.

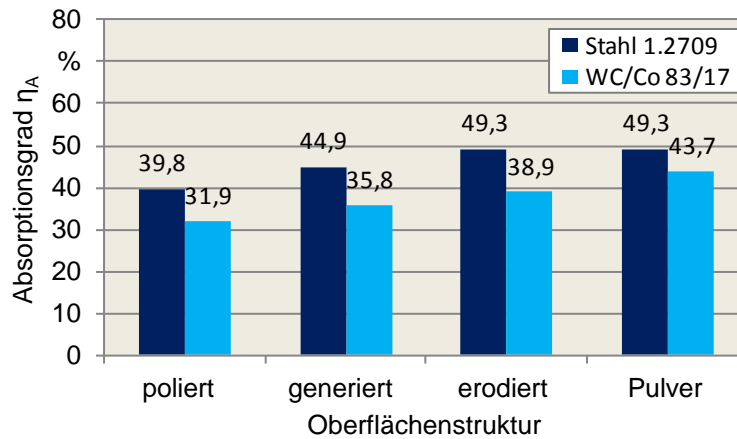


Abbildung 6-2: Gemessene Absorptionsgrade bei variierender Oberflächenstruktur

Der Absorptionsgrad bei Pulvern weist im Vergleich zu Festkörpern höhere Werte auf. Dies lässt sich durch die raue und matte Oberflächenstruktur und mit der damit einhergehenden Mehrfachreflexion und -absorption erklären (KRUTH ET AL. 2003, TOLOCHKO ET AL. 2000).

Über diesen Betrachtungsraum hinaus wurde die Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Laserleistung  $P_L$  sowie der Scan-Geschwindigkeit  $v_L$  aufgezeichnet (siehe Abbildung 6-3).

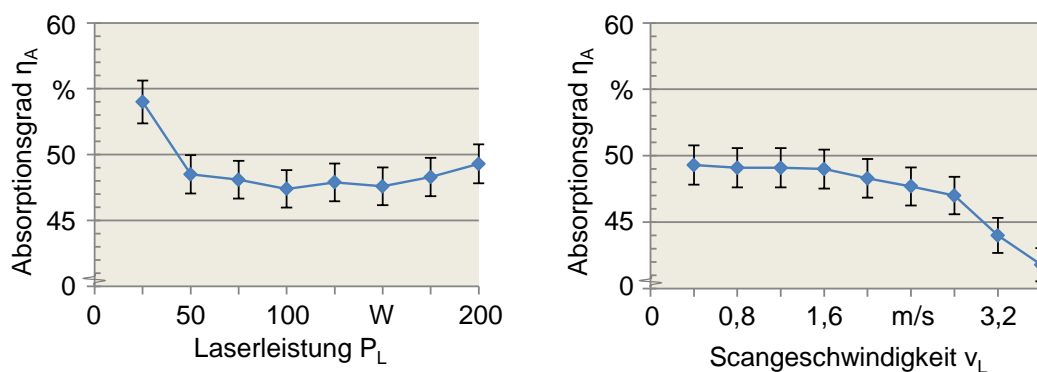


Abbildung 6-3: Gemessener Absorptionsgrad für 1.2709 in Abhängigkeit von der Laserleistung  $P_L$  und der Scan-Geschwindigkeit  $v_L$



Mit zunehmender *Scan*-Geschwindigkeit reduziert sich die eingekoppelte Energie. Im Bereich der technologisch relevanten Geschwindigkeiten ( $< 1600$  mm/s) kann der Absorptionsgrad als konstant angenommen werden. Außerdem beeinflusst der *Hatch*-Abstand  $h_L$  die absorbierte Energie. Diese steigt mit zunehmendem Abstand der Laserbahnen an. Für den prozessüblichen Überlappungsgrad von 30 % (MEINERS 1999) ergab sich der Absorptionsgrad  $\eta_A$  mit 46,9 %. Wird der Abstand mit 130 % des Fokusedurchmessers gewählt, so lassen sich 51,2 % ermitteln. Bei der Energiedichte des Laserstrahls kann ein analoges Verhalten beobachtet werden. So wurde für fokussierte Strahlung stets ein deutlich verminderter Absorptionskoeffizient (15 bis 23 %) gemessen. Die Einflussgrößen (z. B.  $P_L, v_L$ ) der Energiedichte  $E_V$  (vgl. Gleichung 2-1) besitzen eine starke Wechselwirkung. Eine systematische Definition des Prozessfensters zur Qualifizierung neuer Materialien ist deshalb unabdingbar und wird in den folgenden Abschnitten für ein- und zweidimensionale Aufschmelz- und Verfestigungsvorgänge aufgezeigt.

### 6.1.2 Verarbeitung von eindimensionalen Materialspuren

#### 6.1.2.1 Bewertungscharakteristik

Durch die Verarbeitung von Linien können die Prozessparameter für dünnwandige Strukturen festgelegt werden. Für die Bewertung der eindimensionalen Materialspuren wurden folgende Kriterien ausgewählt:

- Die **Schmelzgrenze** definiert die minimal notwendige Energie, um das Pulver stoffschlüssig mit der darunterliegenden Schicht zu verbinden. Diese wird anhand der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit ermittelt.
- Die **Ausdehnung** gibt den Einfluss der Prozessparameter ( $P_L, v_L$ ) auf die Form der Festkörperbahn wieder und wird anhand der Breite und der Höhe bewertet.
- Zuletzt wird die **Durchgängigkeit** der Pulverspur bewertet. Bei hoher Energiedichte kann der sog. *Balling*-Effekt (LUTZMANN 2010) auftreten und die Qualität des Festkörpers maßgeblich vermindern. Beim *Balling* wird die Bauteiloberfläche aufgrund der Oberflächenspannung der Schmelze wellig. Die Durchgängigkeit wird auf Basis der Summe aller Unterbrechungen je Messstrecke bezogen auf die Länge der Messstrecke bewertet.

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

Diese Kenngrößen werden systematisch für einzelne Prozessparametersätze, bestehend aus Laserleistung und *Scan*-Geschwindigkeit, für die Materialien Stahl (X3NiCoMoTi18-9-5) und Hartmetall (WC/Co 83/17) sowie eine Mischung mit jeweils 50 Massenprozent der beiden Werkstoffe erfasst. Hierdurch kann die Verarbeitbarkeit der einzelnen Materialien erforscht sowie die Bewertung der intermetallischen Zwischenschicht vorgenommen werden.

### 6.1.2.2 Schmelzgrenze

Die Schmelzgrenze ist ein essenzielles Kriterium, um die Anzahl der möglichen Parameter gezielt zu reduzieren. In Abbildung 6-4 lässt sich erkennen, dass eine materialspezifische Grenzenergiedichte existiert. Werden die Parameter so gewählt, dass diese im Bereich zu geringer Energie sind, so kann das Material nicht aufgeschmolzen werden. Die Energiedichte setzt sich aus der Laserleistung  $P_L$  und der *Scan*-Geschwindigkeit  $v_L$  zusammen.

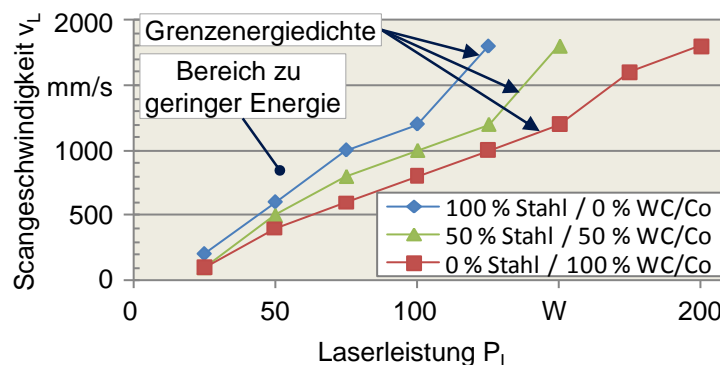


Abbildung 6-4: Minimal notwendige Laserleistung  $P_L$  sowie *Scan*-Geschwindigkeit  $v_L$  für das Aufschmelzen und Verfestigen der Materialien

Der zunehmende Hartmetallanteil in den Pulvermischungen erhöht die notwendige Energiedichte, um das Pulver in die schmelzflüssige Phase zu überführen. Dies kann sowohl durch die geringe Absorptionsrate des Hartmetalls (siehe Abbildung 6-2) als auch durch die verminderte Wärmeleitfähigkeit des Stahls gegenüber dem Hartmetall (siehe Tabelle 4-2, S. 65) erklärt werden.

### 6.1.2.3 Ausdehnung

Die generierten Festkörperbahnen können in ihrer geometrischen Ausprägung stark variieren (siehe Abbildung 6-5). Dies ist sowohl abhängig von der Ge-

schwindigkeit  $v_L$  als auch von der Laserleistung  $P_L$ . Nachstehende Grafik dokumentiert einen exemplarischen Verlauf der Spurbreite  $b_L$  in Abhängigkeit von  $v_L$ .

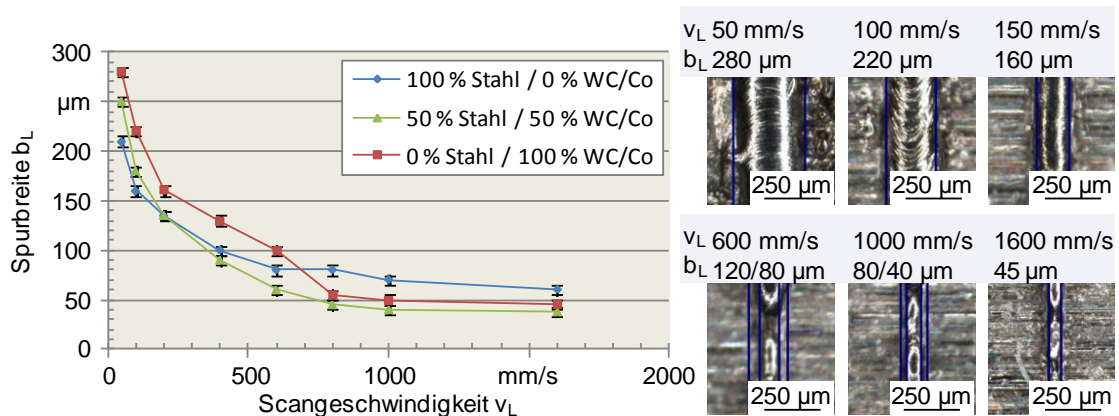


Abbildung 6-5: Spurbreite  $b_L$  in Abhängigkeit von der Scan-Geschwindigkeit  $v_L$  bei einer Laserleistung  $P_L = 200\text{ W}$

Mit zunehmender Geschwindigkeit verringert sich die Spurbreite. Wird  $v_L$  zu groß, kann das Pulver nicht mehr durchgängig aufgeschmolzen werden. Die erzielbare Spurbreite hat großen Einfluss auf den zu wählenden *Hatch*-Abstand  $h_L$ , welcher für zweidimensionale Geometrien notwendig ist. Es lässt sich folgender Zusammenhang formulieren (vgl. Gleichung 6-1):

$$h_L = b_L \cdot a_L \tag{6-1}$$

Die Spurbreite sollte dem Fokussdurchmesser entsprechen. Wird der Laserstrahl langsam über die Pulveroberfläche gelenkt, so kann viel Energie eingekoppelt werden und es entsteht eine breite Festkörperbahn. Durch Vermindern der Laserleistung kann die Ausdehnung der Spur reduziert werden. Zur wirtschaftlichen Fertigung wird angestrebt, die Geschwindigkeit möglichst hoch zu wählen, so dass auch hohe Leistungswerte unerlässlich sind.

### 6.1.2.4 Durchgängigkeit

Neben den oben genannten Kriterien des Aufschmelzgrades sowie der Ausdehnung ist die Durchgängigkeit der Festkörperbahn für die Qualität des Bauteils essenziell. Zur besseren qualitativen Einordnung der Durchgängigkeit wurden die einzelnen Parameterpaare mit Werten von 0 bis 5 versehen, wobei 0 die beste und 5 die schlechteste Bewertung bzw. Durchgängigkeit darstellt (siehe Abbildung 6-6). Nicht untersuchte Parameterkonfigurationen sind mit einem weißen Feld dargestellt.

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

		100 % Stahl und 0 % WC/Co								50 % Stahl und 50 % WC/Co								0 % Stahl und 100 % WC/Co							
		P <sub>L</sub> [W]								P <sub>L</sub> [W]								P <sub>L</sub> [W]							
		25	50	75	100	125	150	175	200	25	50	75	100	125	150	175	200	25	50	75	100	125	150	175	200
v <sub>L</sub> [mm/s]	50	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	100	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
	200		1	1	1	1	1	1	1		1	2	2	2	2	1	1			1	1	1	1	1	1
	400		2	2	2	3	4	4	4			2	2	2	2	2	1			1	1	1	1	1	1
	600			2	2	3	3	4	4				2	2	2	3	3				1	1	1	1	1
	800			2	2	2	3	4	4					2	2	3	3					1	1	1	1
	1000				2	2	2	3	3					2	3	2	3						1	1	1
	1200					2	2	2	2						2	2	2							1	1
	1400					2	2	2	2						1	1	2							1	1
	1600					2	2	2	2						1	1	2								1
	1800						2	2	2							1	1								

0	100 % Durchgängigkeit	2	> 90 % Durchgängigkeit	4	> 70 % Durchgängigkeit
1	> 95 % Durchgängigkeit	3	> 80 % Durchgängigkeit	5	≤ 70 % Durchgängigkeit

Abbildung 6-6: Bewertungsschema für die Durchgängigkeit der Schmelzbahn bei Stahl und WC/Co

Anhand obiger Matrixdarstellung kann verdeutlicht werden, dass WC/Co eine sehr gute Durchgängigkeit der aufgeschmolzenen Bahn aufweist. Mit zunehmendem Stahlanteil reduziert sich diese. Bei den Matrizen für Stahl sowie die Stahl-Hartmetall-Mischung können darüber hinaus noch weitere Bereiche identifiziert werden: Für geringe Geschwindigkeiten kann eine gute Durchgängigkeit ausgemacht werden, welche durch den hohen Energieeintrag erklärt werden kann. Außerdem ist bei niedrigen Geschwindigkeiten das Prozessleuchten (verursacht durch z. B. Schweißspritzer) deutlich stärker ausgeprägt. Überdies wirkt der Laserstrahl bei langsamen Geschwindigkeiten verstärkt in die Breite und erhöht so die Oberfläche der Schmelze und damit auch die notwendige Spannung zur Bildung des sog. *Ballings*. Ab einer Geschwindigkeit von 400 mm/s tritt der *Balling*-Effekt bei Leistungen ab 150 W auf. Wird die Energiedichte reduziert, so steigt die Qualität der Bahn.

Für dünnwandige Bauteile können die Parameter damit auf Basis des ermittelten Bewertungsschemas für den gewählten Stahl und das Hartmetall festgelegt werden. In einem weiteren Schritt sind nun die Parameter für flächiges Aufschmelzen und Verfestigen zu evaluieren.

### 6.1.3 Beurteilung flächiger Materialverarbeitung

#### 6.1.3.1 Bewertungscharakteristik

Für die Analyse der Flächen wurde ein Überlappungsgrad von 30 % unter Berücksichtigung der Pulverspurbreite gewählt. Um eine Fläche zu belichten und somit den Pulverwerkstoff partiell oder vollständig in die schmelzflüssige Phase zu überführen, gibt es unterschiedliche *Scan*-Strategien. Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Einfluss auf die Oberflächenqualität bei einem regelmäßigen *Scan*-Muster und einer *Island*-Belichtung bewertet (vgl. BRANNER 2010). Bei der regelmäßigen *Scan*-Strategie wird die Schicht von einer Bauteilseite zur gegenüberliegenden mit einzelnen aneinander liegenden Mikroschweißbahnen abgefahren. Die *Island*-Belichtung unterteilt die Fläche in kleine Quadrate ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ) und verfestigt diese stochastisch verteilt (HERZOG 2000). Der Einfluss von Laserleistung, Geschwindigkeit und *Scan*-Strategie wird anhand der drei nachstehenden Kriterien bewertet:

- Ein ausschlaggebendes Kriterium für die Qualität ist die **Durchgängigkeit** der Oberfläche. Durch das Aneinanderlegen einzelner Schweißbahnen wird das Pulver zu einer Schicht gefügt. Eine hohe Durchgängigkeit zeichnet sich durch eine vollständige stoffschlüssige Verbindung der Bahnen aus. Die Durchgängigkeit wird durch die Summe aller Unterbrechungen bezogen auf die Messlänge berechnet.
- Durch das systematische Verfestigen der einzelnen Pulverbahnen erhält die Oberfläche eine Struktur, welche durch die Kenngröße **Ebenheit** qualitativ bewertet wird. Die Ebenheit wird durch den Differenzbetrag zwischen Soll- und Ist-Höhe bezogen auf die Soll-Höhe ermittelt.
- Darüber hinaus sind für die Qualität der Oberfläche die prozessbedingten **Anhaftungen** zu berücksichtigen. Viele Anhaftungen können die Qualität des Ebenenverbundes für nachfolgende Schichten herabsetzen und in Delamination resultieren. Die Anhaftungen werden durch den Quotienten Fläche der Anhaftungen zur Gesamtmessfläche definiert.

Um prozessierbare Parametersätze für dreidimensionale Körper bereitzustellen, gilt es oben genannte Kriterien bereits in Versuchen mit flächigen Geometrien zu bewerten. Für die qualitative Einordnung und zur Steigerung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird in Analogie zu den eindimensionalen Versuchen die gleiche Punktesystematik wie in Abschnitt 6.1.2.4 verwendet.

### 6.1.3.2 Durchgängigkeit

Die für Festkörperbahnen angestrebte Durchgängigkeit wird auch auf Ebenen übertragen, sodass die Zielsetzung dieses Abschnittes ist, eine möglichst hohe Oberflächenebenheit zu erzielen. Es soll das Prozessfenster, aufgespannt durch Laserleistung  $P_L$  und  $Scan$ -Geschwindigkeit  $v_L$ , ermittelt werden. Die qualitativ ermittelten Ergebnisse können nachstehenden Matrizen entnommen werden (siehe Abbildung 6-7).

		100 % Stahl und 0 % WC/Co				50 % Stahl und 50 % WC/Co				0 % Stahl und 100 % WC/Co			
		$P_L$ [W]				$P_L$ [W]				$P_L$ [W]			
		50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
$v_L$ [mm/s] mit Islands	50	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
	100	1	0	0	0	2	0	0	0	4	0	0	0
	200	2	0	0	0	3	0	0	0	5	0	0	0
	400		2	1	1		2	1	0		4	1	0
	600		2	1	1		2	2	1		5	4	1
	1000			2	2			3	2			5	4
	1400				3				3				5
$v_L$ [mm/s] ohne Islands	50	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
	100	1	0	0	0	2	0	0	0	4	0	0	0
	200	3	0	0	0	3	0	0	0	5	0	0	0
	400		2	0	0		2	0	0		4	4	0
	600		2	1	1		2	2	0		5	5	4
	1000			2	2			3	2			5	5
	1400				3				3				5

0	100 % Durchgängigkeit	2	> 90 % Durchgängigkeit	4	> 70 % Durchgängigkeit
1	> 95 % Durchgängigkeit	3	> 80 % Durchgängigkeit	5	≤ 70 % Durchgängigkeit

Abbildung 6-7: Bewertungsschema für die Durchgängigkeit der benachbarten Mikroschweißbahnen

Eine sehr hohe Energiedichte erweist sich für die Durchgängigkeit der aneinandergereihten Mikroschweißbahnen als positiv. Wird die  $Scan$ -Geschwindigkeit erhöht, so kann ein kritischer Wert erkannt werden, bei dem sich die Qualität sprunghaft verschlechtert. Ein ähnliches Verhalten tritt bei verminderten Leistungswerten auf. Dieser Qualitätssprung ist für das Hartmetall deutlich stärker ausgeprägt als für Stahl oder die Stahl-Hartmetall-Mischung. Für die beiden letztgenannten Ausgangspulver sind ähnliche Ergebnisse erzielbar. Es konnte für alle untersuchten Materialsysteme kein Einfluss der Belichtungsstrategie auf die Durchgängigkeit der Bauteiloberfläche erkannt werden.

## 6.1.3.3 Ebenheit

Die Ebenheit der generierten Oberfläche ist ein weiteres Kriterium für die Qualität des Prozesses bzw. der gewählten Prozessparameter. Die Ergebnisse der analysierten Probenflächen wurden in Matrizen eingetragen, welche in nachstehender Grafik (siehe Abbildung 6-8) dargestellt sind. Hier zeigt sich ein konträres Bild zur Durchgängigkeit. So weist vor allem die *Island*-Belichtung bei hohen Energiedichten eine verstärkte Unebenheit auf. Außerdem verursachen geringe Geschwindigkeiten und hohe Leistungen eine starke Aufmischung der aktuellen, in Bearbeitung befindlichen Schicht mit den darunterliegenden Schichten. Die damit einhergehenden temperaturindizierten Schmelzbadströmungen (Marangoni-Effekt) verursachen eine raue Oberfläche (ZÄH ET AL. 2009B).

		100 % Stahl und 0 % WC/Co				50 % Stahl und 50 % WC/Co				0 % Stahl und 100 % WC/Co				
		P <sub>L</sub> [W]				P <sub>L</sub> [W]				P <sub>L</sub> [W]				
		50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200	
v <sub>L</sub> [mm/s]	mit Islands	50	1	2	3	3	1	1	3	3	-	2	3	3
	100	1	1	2	3	1	2	2	3	-	1	2	3	
	200	1	2	2	2	2	2	2	3	-	1	2	2	
	400		1	1	1		1	1	1		1	1	1	
	600		1	1	1		2	2	2		-	-	1	
	1000			0	0			2	2			-	-	
	1400				1				0				-	
v <sub>L</sub> [mm/s]	ohne Islands	50	1	1	3	3	1	2	2	2	-	2	2	1
	100	1	1	2	2	1	2	2	2	-	1	1	1	
	200	2	2	1	2	2	1	1	1	-	1	1	1	
	400		1	1	0		1	1	1		-	1	1	
	600		0	1	1		0	2	2		-	-	-	
	1000			0	1			0	0			-	-	
	1400				1				0				-	

0	100 % Ebenheit	2	> 90 % Ebenheit	4	> 70 % Ebenheit
1	> 95 % Ebenheit	3	> 80 % Ebenheit	5	≤ 70 % Ebenheit

Abbildung 6-8: Bewertungsschema für die Ebenheit der Schichtoberfläche

Wird die Leistung verringert oder die *Scan*-Geschwindigkeit gesteigert, so kann die Welligkeit der Schichtoberfläche reduziert werden. Dabei wirken sich vor allem höhere Geschwindigkeiten positiv auf die Ebenheit aus. Limitiert wird das Prozessfenster durch die für das Aufschmelzen und das Verfestigen erforderliche Mindestenergiedichte. Diese ist für WC/Co deutlich höher als für Stahl (siehe Abbildung 6-4). Somit konnten die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1.2.2 verifiziert werden. Darüber hinaus besitzen das Hartmetall sowie die Pulvermischung unter Verwendung der *Island*-Belichtung wahrnehmbar schlechtere Oberflächeneigenschaften. Diese sind vor allem auf die Randbereiche der einzelnen *Islands* zurückzuführen. Parameterbedingt nicht herstellbare Proben (z. B. durch Ablösung

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

der Proben von der Grundplatte) wurden mit „-“ in den Matrizen kenntlich gemacht.

### 6.1.3.4 Anhaftung

Als letztes Bewertungskriterium für die flächige Materialverarbeitung wurden Anhaftungen betrachtet, welche sich aus dem ungenügenden Aufschmelzen des Pulvers sowie den beim Prozess auftretenden Schweißspritzern ergeben. So zeichnen primär zu gering gewählte Laserleistungsparameter für ein hohes Maß an Anhaftungen verantwortlich (siehe Abbildung 6-9). Mit steigender Leistung verringern sich diese kontinuierlich.

		100 % Stahl und 0 % WC/Co				50 % Stahl und 50 % WC/Co				0 % Stahl und 100 % WC/Co				
		$P_L$ [W]				$P_L$ [W]				$P_L$ [W]				
		50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200	
v <sub>L</sub> [mm/s]	mit Islands	50	3	2	2	1	2	2	2	1	-	3	1	1
		100	3	2	1	0	3	2	1	1	-	2	1	1
		200	3	1	0	1	3	1	1	1	-	2	2	1
		400		1	1	0		2	1	1		2	2	2
		600		2	0	1		3	1	1		-	-	1
		1000			1	0			1	1			-	-
		1400				1				1				-
v <sub>L</sub> [mm/s]	ohne Islands	50	3	3	2	0	2	2	1	1	-	2	1	1
		100	3	2	1	0	3	3	2	1	-	3	1	1
		200	3	2	0	0	3	3	1	1	-	4	1	1
		400		1	1	0		3	1	1		2	2	2
		600		2	1	0		2	1	1		-	-	-
		1000			0	0			2	1			-	-
		1400				0				2				-

0	0 % Anhaftungen	2	< 10 % Anhaftungen	4	< 30 % Anhaftungen
1	< 5 % Anhaftungen	3	< 20 % Anhaftungen	5	≥ 30 % Anhaftungen

Abbildung 6-9: Bewertungsschema für Anhaftungen von Pulver und Schweißspritzern an der Oberfläche

Wie die oben dargestellten Bewertungskriterien veranschaulichen, ist die Auslegung der Strahlschmelzparameter ein multikriterielles Optimierungsproblem. Für den gewählten Stahlwerkstoff sind hohe Leistungen (z. B.  $P_L = 200$  W) vorteilhaft. Die Geschwindigkeiten sollten im Bereich zwischen 400 mm/s und 800 mm/s liegen.

Für das WC/Co-Pulver sind ebenfalls hohe Leistungen unter Berücksichtigung der Bewertungskriterien förderlich. Die für den Verfestigungsprozess erforderliche Energiedichte ist jedoch deutlich höher als beim Stahl. Deshalb gilt es, die Belichtungsgeschwindigkeit zwischen 200 mm/s und 400 mm/s zu wählen, da



die Laserleistung nicht gesteigert werden kann und eine erhöhte Energieeinbringung nur durch die Reduzierung der *Scan*-Geschwindigkeit möglich ist. Diese Prozessparameterbereiche wurden für das Generieren der nachfolgenden Probekörper verwendet.

## 6.2 Bewertung der prozessbedingten Bauteileigenschaften

### 6.2.1 Motivation zur Bauteilcharakterisierung

Der Strahlschmelzprozess hat, bedingt durch den schichtweisen Aufbau, einen großen Einfluss auf die Bauteileigenschaften. So untersuchte SEHRT in seiner Arbeit die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Orientierung des Bauteils im Bauraum ausführlich und stellte eine prozessbedingte Richtungsabhängigkeit fest (SEHRT 2010). Weiterhin ist die Porosität des Bauteils stark an die gewählten Prozessparameter gekoppelt (MEINERS 1999, OVER 2003). Es lassen sich darüber hinaus noch weitere Bewertungsmerkmale für die prozessabhängige Bauteileigenschaften benennen. Nachfolgend sollen am Beispiel der Materialkombination, bestehend aus dem Hartstoff WC/Co und dem Warmarbeitsstahl 1.2709, weitere Eigenschaften (vgl. Abschnitt 6.2.2 bis 6.2.7) untersucht werden. Der Schwerpunkt der Analyse liegt dabei auf WC/Co, da für 1.2709 bereits fundierte Ergebnisse vorliegen (BRANNER 2010, DIMETER & MAYER 2009).

### 6.2.2 Metallurgische Untersuchung

Die Verarbeitung von Zweikomponentenwerkstoffen, wie WC/Co, in der laserbasierten additiven Fertigung erfordert eine genaue Betrachtung, bedingt durch die prozessspezifischen Temperatursprünge (KRUTH ET AL. 2004A). Die metallurgische Untersuchung liefert wichtige Erkenntnisse zur Zusammensetzung des Hartmetalls und zum Prozesseinfluss auf die späteren Bauteileigenschaften. Die Probenvorbereitung erfolgt nach DIN EN ISO 4499-1 (DIN EN ISO 4499, TEIL 1 2010). Mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und einer energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) kann sowohl die Verteilung als auch die Größe der WC-Partikel untersucht werden (siehe Abbildung 6-10).

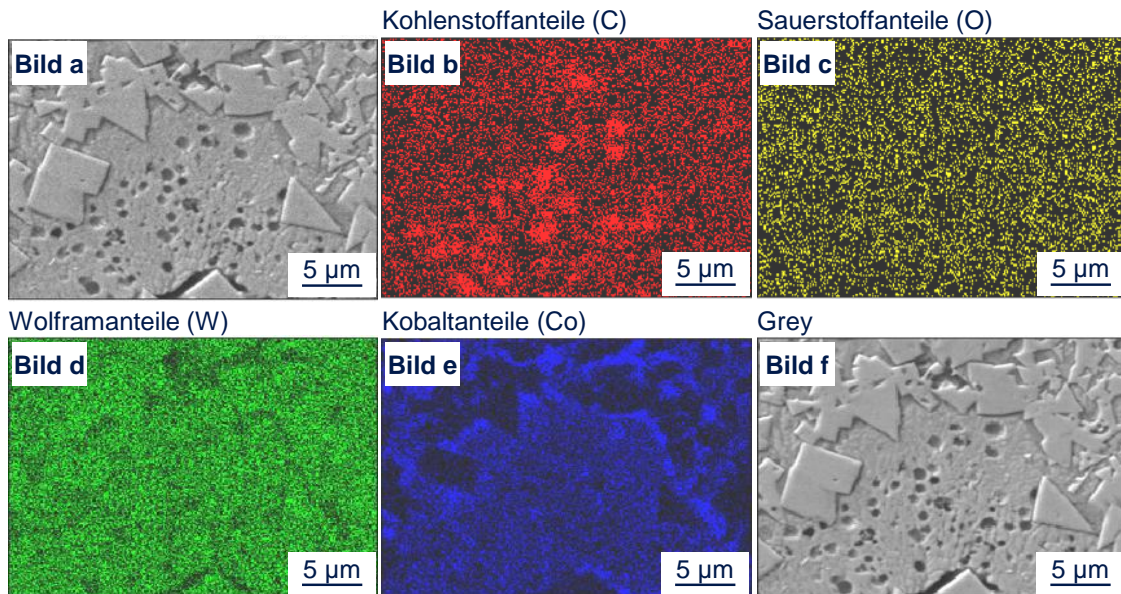


Abbildung 6-10: REM-Aufnahmen und EDX-Analyse eines Schliffes der WC/Co-Schicht

Je gleichmäßiger die Verteilung und je kleiner die Partikel sind, desto widerstandsfähiger ist das Material im späteren Einsatz (SANDVIK 2010). In den REM-Aufnahmen lässt sich erkennen, dass die Korngröße der Hartstoffpartikel als grob bis mittel eingestuft werden kann (a). Darüber hinaus dokumentiert die EDX-Analyse, dass Kohlenstoffanreicherungen (b) im Bereich der Poren vorliegen. Sowohl Sauerstoff (c) als auch Wolfram (d) sind gleichmäßig verteilt. Kobalt (e) weist eine hohe Benetzbarkeit durch die Anlagerung an den Hartstoffpartikeln auf. Dies deutet auf eine gute stoffschlüssige Verbindung zwischen Matrix und Struktur des Hartmetalls hin.

### 6.2.3 Thermische Eigenschaften

#### 6.2.3.1 Thematische Einordnung

Eine große Diskrepanz in der Wärmeleitung der einzelnen Werkstoffe kann die Kombinierbarkeit dieser Materialien erschweren oder sogar verhindern. Weiterhin ist die Wärmeausdehnung für die Beständigkeit der Werkstoffverbindung entscheidend. Sowohl während des Strahlschmelzprozesses als auch im späteren Anwendungsfall abweichende Dehnungswerte zu spannungsinduzierten Rissen oder sogar zu Desintegration des Schichtverbundes führen (DOLL ET AL. 2009). In den folgenden Abschnitten werden beide Eigenschaften betrachtet.

### 6.2.3.2 Wärmeleitung

Das wichtigste Wärmetransportphänomen für die Weitergabe der absorbierten Laserstrahlung im Bauteil bzw. auch im Pulverbett ist die Wärmeleitung (vgl. Abschnitt 4.5). Nachfolgende Werte wurden durch die Laserflash-Methode nach DIN 30905 ermittelt (DIN 30905 1998).

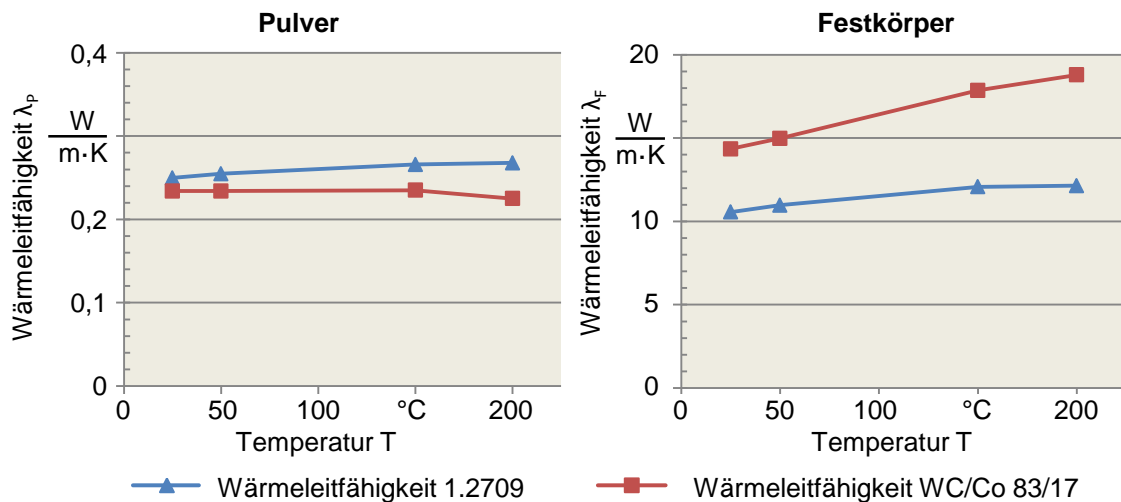


Abbildung 6-11: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit für Pulver (links) und generierte Festkörper (rechts)

Die Wärmeleitfähigkeit des Stahl- und des WC/Co-Pulvers besitzt annähernd vergleichbare Werte (siehe Abbildung 6-11, links). Die Schüttgutdichte beträgt dabei für 1.2709  $5,22 \text{ g/cm}^3$  und für WC/Co  $7,46 \text{ g/cm}^3$ . Werden die Materialien zu einem Festkörper verschmolzen, so wird die Dichte bei Stahl auf  $8,02 \text{ g/cm}^3$  und beim Hartmetall auf  $11,83 \text{ g/cm}^3$  erhöht. Die gesteigerte Dichte der Festkörper führt auch zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 6-11 rechts). Die Restporosität der WC/Co-Struktur hat zur Folge, dass die Wärmeleitung des additiv erzeugten Körpers deutlich geringer ist als bei vergleichbaren Hartmetallen mit geringem Porenanteil (SANDVIK 2010). Analog verhält es sich bei den Wärmeleitfähigkeitswerten des Stahls. Diese sollten laut Literatur bei Raumtemperatur  $14 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  betragen (N.N. 2005). Die Wärmeleitfähigkeit ist somit, verglichen mit konventionell hergestellten Probekörpern, für beide Materialien vermindert.

### 6.2.3.3 Wärmeausdehnung

Das selektive Aufschmelzen während des additiven Prozesses führt zu einer Wärmedehnung sowohl des Beschichtungstoffes als auch des Substrates. Weichen deren Dehnungswerte stark voneinander ab, so kann dies zu Rissen und schlussendlich zur Delamination innerhalb des Schichtverbundes führen. Die Wärmedehnung für den Stahl und das gewählte Hartmetall wurde anhand zweier Proben (P1, P2) für die Aufheiz- und Abkühlphase ermittelt (siehe Abbildung 6-12). Dies offenbart für beide Materialien und Temperaturgradienten einen linearen Zusammenhang. Die Wärmedehnung kann bei 400 °C für Stahl mit 0,41 %, für Hartmetall mit 0,21 % gegenüber der Ausgangstemperatur von 28 °C angegeben werden.

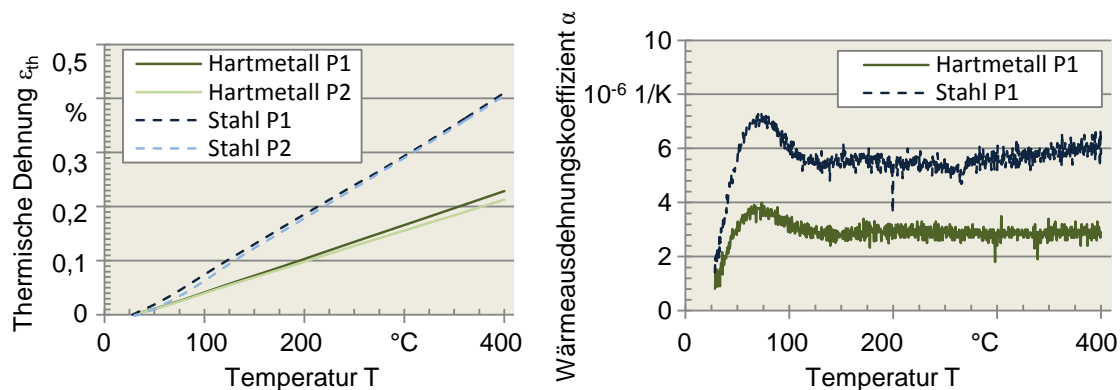


Abbildung 6-12: Thermische Dehnung  $\epsilon_{th}$  und Wärmedehnungskoeffizient  $\alpha$  von additiv hergestellten Hartmetall- (WC/Co) und Stahlproben (1.2709)

Die geringen Wärmedehnungswerte der beiden Materialien (vgl. Abbildung 6-12, rechts) lassen auf eine dauerhafte Einsetzbarkeit der Werkstoffkombination schließen. Es können jedoch aufgrund dieser Untersuchung keine Aussagen zur Thermoschockbeständigkeit getroffen werden. Diese sollten je nach Anwendungsfall optional analysiert werden.

Ein Vergleich zwischen den strahlgeschmolzenen Proben mit thermisch gespritzten WC/Co-Schichten (KNY ET AL. 1986) und durch Drucksintern (BARAT CARBIDE 2011, SANDVIK 2010) hergestellten Körpern zeigt analoge spezifische Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen  $3,95 \cdot 10^{-6} 1/K$  und  $5,31 \cdot 10^{-6} 1/K$ . Dies verdeutlicht, dass der Strahlschmelzprozess geringen Einfluss auf diese Werkstoffkennwerte besitzt.

### 6.2.4 Mechanische Eigenschaften

#### 6.2.4.1 Bestimmung der relativen Dichte

Basierend auf dem Vorgehensmodell für ein- und zweidimensionale Strukturen wurde die relative Dichte für dreidimensionale Körper bestimmt. Die Bewertung erfolgte anhand äquivalenter Prozessparameter, bestehend aus *Scan*-Geschwindigkeit  $v_L$  und Laserleistung  $P_L$ . Die relativen Dichtewerte  $d$  wurden mit Hilfe des „Archimedischen Prinzips des Auftriebs“ ermittelt. Der Zusammenhang kann durch folgende Gleichung (vgl. Gleichung 6-2) beschrieben werden:

$$d = \frac{m_W \cdot \rho_L - m_L \cdot \rho_W}{(m_W + m_L) \cdot \rho_0} \quad (6-2)$$

Die relativen Dichtewerte wurden für Stahl und Hartmetall ermittelt (siehe Abbildung 6-13). Dabei ist festzustellen, dass die maximal erzielbaren Werte für Stahl sehr eng beieinander liegen und bis zu 99,9 % erreicht werden können. Im Wesentlichen kann eine Abhängigkeit der relativen Dichte sowohl von der Belichtungsgeschwindigkeit als auch von der Laserleistung erkannt werden. Mit zunehmender Leistung bei konstanter Geschwindigkeit steigt die relative Dichte an. Sowohl bei zu geringer als auch bei zu hoher Energiedichte für den Strahlschmelzprozess verringert sich die resultierende relative Dichte.

		100 % Stahl					100 % WC/Co				
		$P_L$ [W]					$P_L$ [W]				
		100	125	150	175	200	100	125	150	175	200
v <sub>L</sub> [mm/s]	50	98,9	97,9	97,4	97,8	97,7	98,0	-	-	-	-
	100	98,5	98,3	98,1	97,4	97,7	94,4	95,6	95,9	97,4	97,6
	200	97,6	98,8	98,6	98,5	98,6	-	91,6	93,8	95,9	97,7
	300		98,2	99,5	99,4	98,6		-	-	96,0	96,3
	400			98,3	99,3	99,6			-	-	92,4
	500				99,2	99,9				-	-
	600					99,5					-

Abbildung 6-13: Ermittelte relative Dichte  $d$  [%] additiv gefertigter Proben für Stahl (1.2709) und Hartmetall (WC/Co) in Prozent

Für WC/Co-Körper sind sowohl die gemessenen Restporositäten als auch die Abstufung zwischen den einzelnen Werten deutlich höher. So sind minimal 2,0 % an Poren im Bauteil enthalten. Bei den Untersuchungen bestätigt sich der Trend hin zu deutlich niedrigeren *Scan*-Geschwindigkeiten für das Hartmetall im Vergleich zu Stahl. Darüber hinaus konnte ein analoger Einfluss der *Scan*-

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

Geschwindigkeit und der Laserleistung auf die Restporosität, wie für den untersuchten Stahlwerkstoff, ermittelt werden. Parameter mit zu geringer Energiedichte konnten auf Grund von Delamination nicht untersucht werden (mit „-“ gekennzeichnet).

### 6.2.4.2 Biegebruchfestigkeit

Die Biegebruchfestigkeit ist für Hartmetalle eine gängige Charakterisierungsgröße und sollte deshalb nicht fehlen (GLÄSER 2010). Für die Festigkeitsermittlung wurde der Drei-Punkt-Biegeversuch (Abbildung 6-14) verwendet. Die Biegebruchfestigkeit  $R_{bm}$  errechnet sich nach Gleichung 6-3:

$$R_{bm} = \frac{3 \cdot k \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (6-3)$$

Die Probenabmessungen der WC/Co-Stäbe betragen  $3 \times 4 \times 20 \text{ mm}^3$  ( $b \times h \times l$ ).

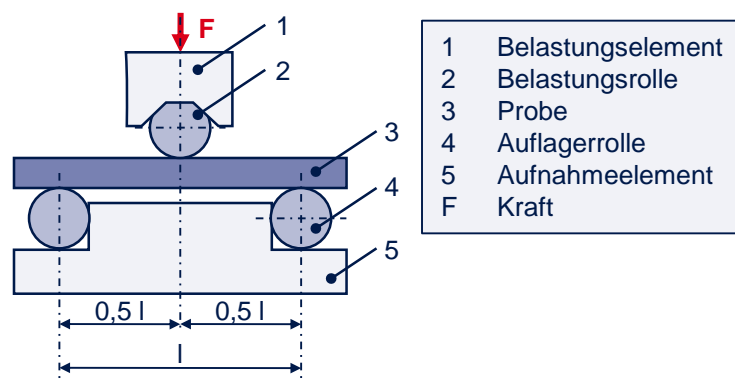


Abbildung 6-14: Versuchskonfiguration zur Ermittlung der Biegebruchfestigkeit (DIN EN ISO 3327 2009)

Die Defekte (z. B. Poren) der Versuchskörper haben einen starken Einfluss auf die Belastbarkeit der Proben. So wirken sich diese einerseits durch den verminderten Festkörperquerschnitt und andererseits durch die resultierende Kerbwirkung aus. Deshalb können für das untersuchte Material WC/Co 83/17 nur geringe Biegefestigkeitswerte im Bereich von 398,4 MPa bis 568,3 MPa erzielt werden. Durch konventionelle Sintertechnik hergestellte vergleichbare Hartmetallkörper können ein Vielfaches dieser Werte erreichen (SANDVIK 2010).

### 6.2.4.3 Härtemessung

Die Härte eines Materials stellt ein gutes Indiz für dessen Verschleißfestigkeit dar (HABIG 1980). Es besteht jedoch keine direkte Korrelation zwischen der

## 6.2 Bewertung der prozessbedingten Bauteileigenschaften

Härte und dem Verschleißverhalten des Bauteils, sodass es erkenntnisreicher ist, beide Merkmale getrennt voneinander zu betrachten.

In der Materialprüfung existieren unterschiedliche Messmethoden zur Bestimmung der Härte (WEISSBACH 2001). Das Prinzip nach Vickers hat sich für Hartstoffe etabliert, sodass auf dieses zurückgegriffen wird (DIN ISO 3878 1991). Die Proben, bestehend aus einem Stahl-Grundkörper und einer 1 mm starken WC/Co-Schicht, wurden in Hybridbauweise hergestellt. Die hohe Dicke der Hartmetallschicht schließt Einwirkungen des darunterliegenden Stahlsubstrates aus. Nachfolgende Tabelle 6-1 fasst die ermittelten Härtewerte sowohl für WC/Co 88/12 als auch für WC/Co 83/17 zusammen.

*Tabelle 6-1: Härtewerte strahlgeschmolzener Proben aus WC/Co nach Vickers für 12 % und 17 % Co-Anteil*

Probennummer	WC/Co 88/12 Vickers 0,3 [HV]	WC/Co 83/17 Vickers 0,3 [HV]
1	1350	1358
2	1280	1139
3	1419	1203
4	1324	1358
5	1405	1375
<b>Mittel</b>	<b>1355</b>	<b>1287</b>

Es ist zu erkennen, dass die Härte des Hartstoffes mit höherem Co-Anteil vermindert ist. Die Korrelation zwischen Härte und Co-Anteil ist analog bei konventionell durch Drucksintern hergestellten Bauteilen erkennbar (SCHEDLER 1988). Durch Schichtbauverfahren produzierte Hartstoffproben besitzen eine höhere Härte, als das bei vergleichbaren, durch thermisches Spritzen hergestellten Proben der Fall ist. So hat eine mittels HVOF hergestellte WC/Co-Schicht mit 17 % Kobalt lediglich 1100 HV im Vergleich zur additiv gebildeten Probe mit einer Härte von 1287 HV. Die erhöhte Härte des strahlgeschmolzenen Bauteils ist auf Umlegierungen während des Prozesses zurückzuführen.

### 6.2.5 Tribologische Eigenschaften

Tribologische Belastungsfälle sind sehr vielfältig (CZICHOS & HABIG 2010). Mit Hilfe der nachfolgenden Untersuchung soll speziell die Verschleißbeständigkeit bei abrasiver Belastung in trockener Atmosphäre bewertet werden. Die Strahl-



## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

verschleiß-Prüfung repräsentiert einen hierfür geeigneten Versuch (siehe Abbildung 6-15).

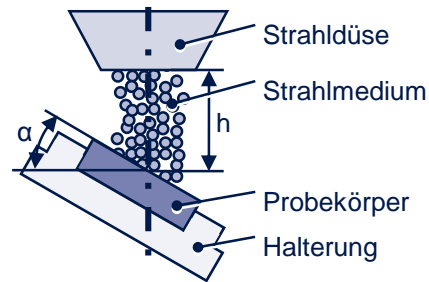


Abbildung 6-15: Versuchskonfiguration für die winkelabhängige Strahlverschleiß-Prüfung

Bei dieser Untersuchung wird der Probekörper konzentrisch mit unterschiedlichen Medien bestrahlt, die Masse des Versuchsträgers jeweils vor und nach dem Strahlvorgang gemessen und so die Verschleißrate ermittelt (siehe Abbildung 6-16).

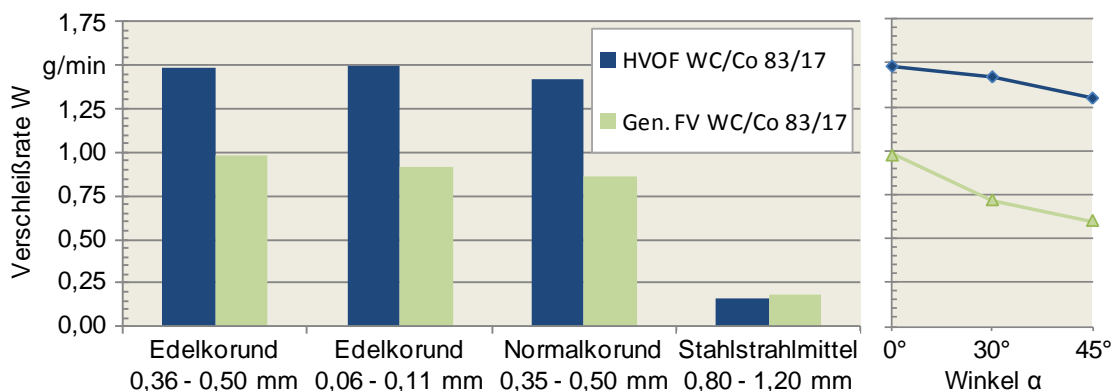


Abbildung 6-16: Verschleißrate beim Prallstrahlen (links) sowie unter Berücksichtigung unterschiedlicher Strahlwinkel (rechts)

Der Abstand  $h$  zwischen Probekörper und Strahldüse wurde mit 100 mm und der Strahldruck mit 6 bar gewählt. Es zeigt sich, dass die additiv erzeugten WC/Co-Schichten einen deutlich verminderten Masseabtrag aufweisen als die HVOF-Schichten. Wird der Winkel  $\alpha$  vergrößert, so vermindert sich der Aufprall und das abgetragene Volumen nimmt für alle drei untersuchten Proben ab (siehe Abbildung 6-16, rechts). Bei den WC/Co-Schichten führt die hohe Härte zum Herausbrechen einzelner Schichtelemente.



### 6.2.6 Chemische Eigenschaften

Die chemischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen spielen eine wichtige Rolle (BERNS 1998), da durch die Materialkombination die sog. Kontaktkorrosion auftreten kann. Diese wurde in der vorliegenden Werkstoffpaarung unter Verwendung von zwei wässrigen Lösungen, Trinkwasser ( $H_2O$ ) und Natriumchloridlösung ( $NaCl$ ) mit einer Konzentration von  $c = 0,01 \text{ mol/l}$ , elektrochemisch untersucht. Der Versuchsaufbau erfolgte in Analogie zur DIN 50919 (DIN 50919 1984).

Die Ergebnisse der elektrochemischen Messung dokumentieren, dass der hochlegierte Stahl überwiegend geringere Ruhepotentiale (-190 bis -320 mV) aufweist als das Hartmetall (-330 bis -470 mV) gegenüber der gesetzten Kalomel-Elektrode. Das überwiegend anodisch polarisierte Hartmetall reicht i. d. R. nicht aus, um die leicht kathodische Polarisierung des Stahls im Sinne eines kathodischen Korrosionsschutzes komplett zu unterdrücken.

Auf Basis der geringen Potentiale ist bei dieser Werkstoffkombination keine wesentliche Kontaktkorrosion zu erwarten. Es ist eine vergleichbare Korrosionsbeständigkeit wie bei thermisch gespritzten und somit formschlüssig haftenden Schichten (KNY ET AL. 1986) anzunehmen. KNY konnte für WC/Co eine Korrosionsrate von weniger als  $2 \text{ mg/cm}^3$  je Tag ermitteln. Würde der Stahlwerkstoff ohne die Hartstoffbeschichtung verwendet werden, so wäre der Korrosionsfortschritt deutlich höher.

### 6.2.7 Technologische Eigenschaften

#### 6.2.7.1 Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit liefert Rückschlüsse über die späteren Einsatzmöglichkeiten bzw. die Notwendigkeit der Nacharbeit der Funktionsflächen. Sie ist ein wichtiges Merkmal zur Bewertung der Qualität der Technologie (SEHRT 2010) und liefert einen weiteren Baustein für die ganzheitliche Bewertung der Beschichtungsoberfläche und somit der Multimaterialstruktur (siehe Abbildung 6-17).

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

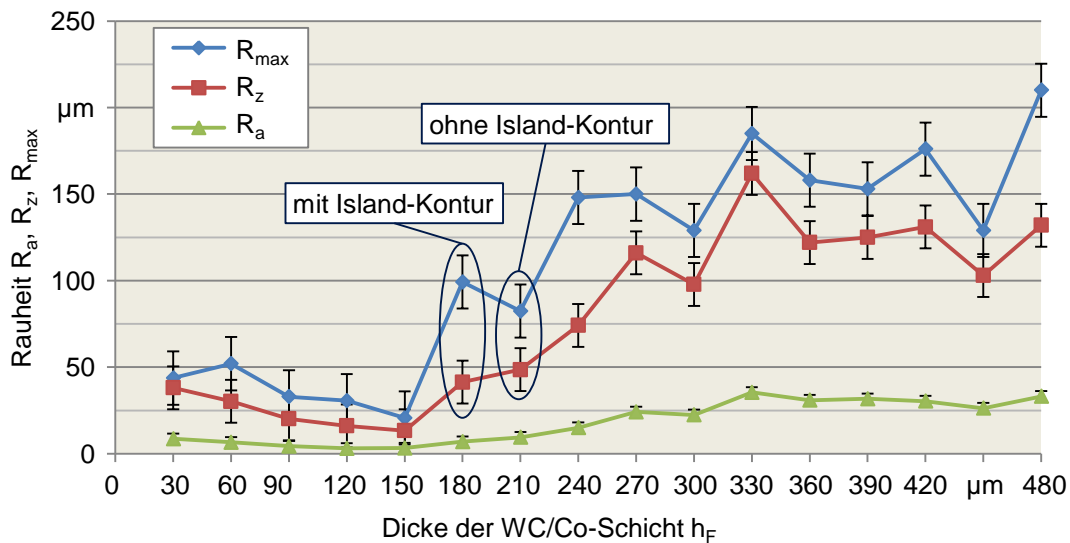


Abbildung 6-17: Oberflächenrauheit in Abhängigkeit von der Beschichtungshöhe

Um die Oberflächenrauheit hinsichtlich der Materialkombination zu untersuchen, wurde die WC/Co-Beschichtung auf additiv erzeugte Stahlkörper in Hybridbauweise aufgebracht. Die gegebene Ausgangsrauheit  $R_z$  von  $38,1 \mu\text{m}$  ist auf den verwendeten Substratkörper zurückzuführen.

Bis zu einer Beschichtungsstärke von  $150 \mu\text{m}$  kann ein leichter Rückgang der Oberflächenrauheit beobachtet werden. Anschließend steigt die Rauheit mit jeder weiteren Schicht an. Die anlagenspezifische *Scan*-Strategie (MEINERS 1999), basierend auf einer stochastisch verteilten *Island*-Belichtung (BRANNER 2010), führt zu lokalen Minima und Maxima im Rauheitsverlauf. Ist eine *Island*-Kontur in der Messstrecke enthalten, hat dies ein lokales Maximum zur Folge.

Darüber hinaus ist die Orientierung der Oberfläche zur Grundplatte für die erzielbaren Rauheitswerte von Bedeutung. In nachstehendem Diagramm (siehe Abbildung 6-18) sind die Einflüsse der Bauteilorientierung dargestellt. Dabei kann zwischen Hartmetall (WC/Co) und Stahl (1.2709) sowie der Ober- und Unterseite der jeweiligen Proben unterschieden werden.

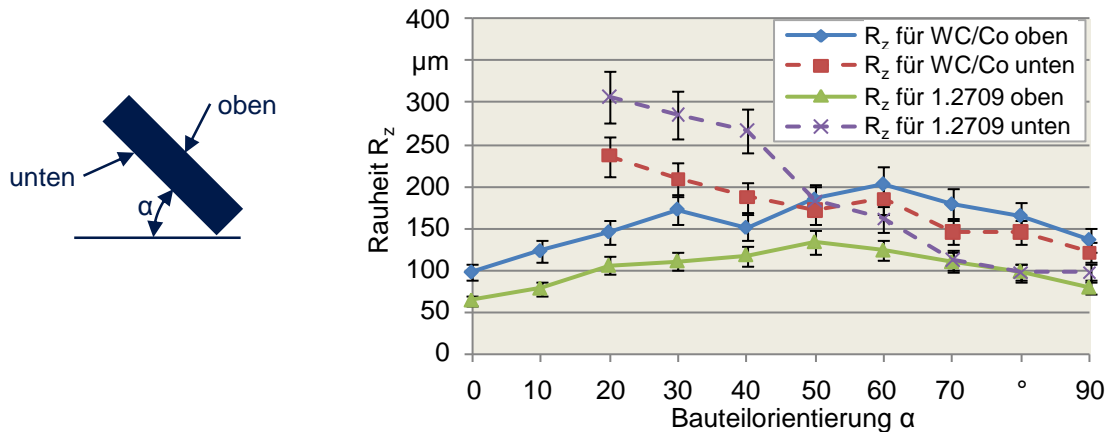


Abbildung 6-18: Einfluss der Bauteilorientierung auf die Oberflächenrauheit für WC/Co und 1.2709

Es wird deutlich, dass mit zunehmendem Winkel die Rauheit der nach unten orientierten Oberfläche reduziert wird und die niedrigsten Rauheitswerte bei einer Ausrichtung in Aufbaurichtung auftreten (gestrichelter Verlauf). Die hohen Rauheitswerte lassen sich durch den Verzicht auf eine *Support*-Struktur, die daraus resultierende unkontrollierte Wärmeableitung in das Pulverbett und die damit einhergehenden Pulveranhaftungen erklären. Bei den oberen Flächen hat die Rauheit bei einem Winkel von 50° bzw. 60° ihr Maximum. Mit zunehmendem Winkel vermindert sich diese wieder. Für technische Anwendungen ist es angesichts dieser Rauheitswerte unerlässlich, die Oberfläche den geforderten Werten anzupassen, z. B. durch Schleifen.

### 6.2.7.2 Form- und Maßgenauigkeit

Die Form- und Maßgenauigkeit ist eine weitere wichtige Kennzahl zur Bestimmung der technologischen Eigenschaften (KÖHLER ET AL. 2009). Dabei werden absolute sowie relative Abweichungen des Ist-Körpers von der Soll-Geometrie gemessen. Zur Bewertung der geometrischen Eigenschaften wurde ein komplexer Formkörper entwickelt, um die materialabhängigen Grenzen aufzeigen zu können. Dieses Referenzmodell besteht aus vielfältigen Formelementen (siehe Abbildung 6-19). Dabei wurden folgende Elemente gewählt:

- Zylinder stehend (1) und liegend (2)
- Bohrungen stehend (3) und liegend (verdeckt)
- Quader stehend (4) und liegend (5)
- Quaderförmige Vertiefungen stehend (verdeckt) und liegend (6)

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

- Winkel und Übergänge (7)

Für die Gegenüberstellung der Ausgangsdaten mit den gefertigten Strukturen wurde auf das Comet-System der Fa. Steinbichler Optotechnik GmbH zurückgegriffen. Dieses nutzt die Streifenlichtprojektion, um die Bauteiloberfläche zu vermessen. Die zugehörige Auswertesoftware ermöglicht es, die Ausgangsgeometrie zu importieren und mit dem erhaltenen Oberflächenmodell zu vergleichen.

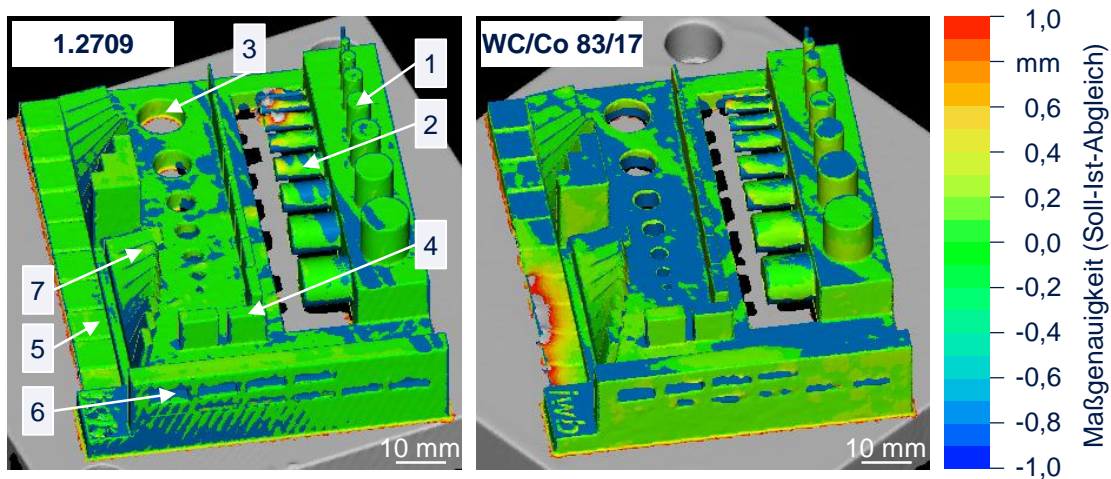


Abbildung 6-19: Grafische Darstellung der Maßhaltigkeit (Soll-Ist-Abgleich) des Referenzkörpers für 1.2709 und WC/Co 83/17

Die Geometrielemente konnten für beide Werkstoffe gut aufgebaut werden. Wesentliche Abweichungen ( $> 1$  mm) wurden lediglich bei den liegenden Quadrern sowie den liegenden Zylindern festgestellt. Die Überhänge weisen, in Abhängigkeit von der Bauteilorientierung, eine stark erhöhte Rauheit auf (vgl. Abschnitt 6.2.7.1). Die schwierigere Verarbeitung von WC/Co wird auch durch die erhöhten Abweichungen bei den Formen (2) und (5) belegt. Durch sog. *Support-Strukturen* (vgl. BRANNER 2010) kann die Form- und die Maßgenauigkeit der liegenden Formen deutlich gesteigert werden.

In nachfolgender Abbildung 6-20 sind die beiden Referenzkörper nochmals wiedergegeben. Die oben verdeckten, liegenden Bohrungen (8) sowie die stehenden, quaderförmigen Vertiefungen (9) können in dieser Darstellung erkannt werden.

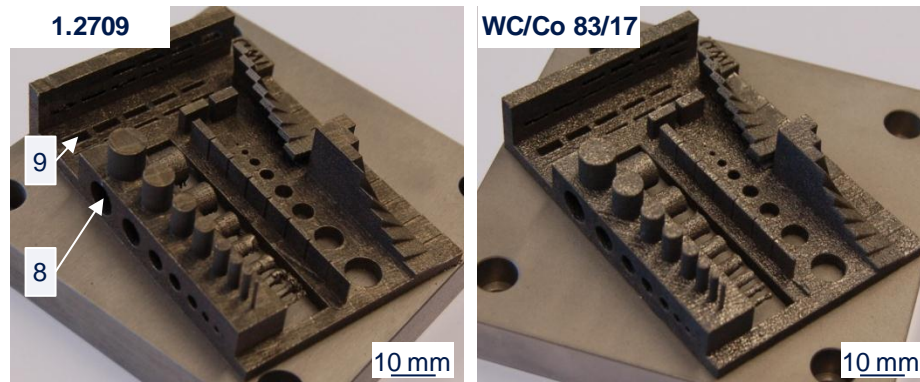


Abbildung 6-20: Aufgebaute Referenzkörper zur Bewertung der Form- und Maßhaltigkeit für 1.2709 und WC/Co 83/17

### 6.3 Festigkeit der Werkstoffkombination

#### 6.3.1 Vorgehensweise zur Bewertung

Bedingt durch die Kombination von zwei oder mehr Werkstoffen zu einem multimateriellen Bauteil, sind die grundlegenden Materialeigenschaften (vgl. Abschnitt 6.2) durch Untersuchungen der Verbindungsqualität zu erweitern. Die Wahl der Bewertungsmethode ist von der Art der Belastung des Schichtverbundes abhängig. So wird die normale Haftfestigkeit durch den Zugversuch (DIN EN 582 1994) und die tangentielle Haftfestigkeit durch den Scherversuch (DIN EN 15340 2007) überprüft. Beide Normen stammen aus dem Bereich der Dickschichtbeschichtung.

#### 6.3.2 Haftzugfestigkeit

Zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit können zwei Aufbauten gewählt werden (siehe Abbildung 6-21).

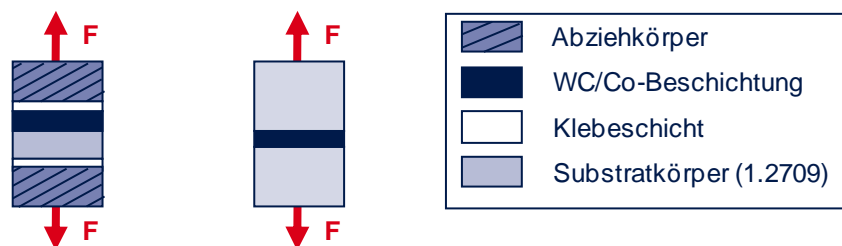


Abbildung 6-21: Versuchskonfiguration für Haftzugfestigkeit nach DIN EN 582 (DIN EN 582 1994)

## 6 Prozesseignung von Materialien und Bewertung der Bauteilqualität

Dickschichtbeschichtungen werden unter Verwendung von Methode 1 geprüft. Hierbei wird die Kombination, bestehend aus Substratkörper und Beschichtung, mittels zweier Klebeschichten zwischen den Abziehkörpern eingeklebt. Die Festigkeit des Klebers erweist sich jedoch für additiv erzeugte Schichtverbünde als nicht ausreichend. Die in nachfolgender Tabelle dargestellten Werte  $R_m$  geben die Festigkeit zwischen Klebstoff und Testkörper wieder (siehe Tabelle 6-2). Um die Haftfestigkeit zu steigern, ist das Präparieren der Oberfläche durch Strahlen unerlässlich (vgl. Probe Nr. 1 und 2).

Tabelle 6-2: *Ermittelte Haftzugfestigkeitswerte für WC/Co 88/12 (links) und WC/Co 83/17 (rechts) nach Methode 1*

Probennummer	Substrat	Schicht	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Probennummer	Substrat	Schicht	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	1.2709	WC/Co 88/12	68	1	1.2709	WC/Co 83/17	59
2			86	2			85
3			84	3			83
4			86	4			81
5			87	5			83

Wird Methode 2 angewendet, basierend auf der additiven Hybridbauweise (GLÄSER & KLOCKE 2009), ist der Aufbau entsprechend Abbildung 6-21 zu wählen. Es zeigt sich, dass die real vorliegenden Festigkeitswerte  $R_m$  zwischen Substrat und Beschichtung deutlich höher sind als die ermittelten Werte nach Methode 1 (siehe Tabelle 6-3). Jedoch weisen die Werte eine große prozessabhängige Streuung auf, deren Ursachen in der intermetallischen Zwischenschicht der beiden Materialien zu suchen sind. Die Analyse dieser Schicht soll im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht vertieft werden.

Tabelle 6-3: *Ermittelte Haftzugfestigkeitswerte für WC/Co 83/17 nach Methode 2*

Probennummer	Substrat	Schicht	Querschnitt $S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	Zugkraft $F_z$ [N]	Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	1.2709	WC/Co 83/17	113,1	10,58	94
2				14,40	127
3				12,82	113
4				20,68	183
5				13,80	122

Die Bruchlage aller fünf Proben befindet sich stets in der Fugebene zwischen Substrat und Beschichtung. Ein Vergleich der erzielten Werte mit denen thermisch gespritzter Schichten offenbart, dass letztere übertroffen werden können (BERTRAM & SCHEMMER 1985).

### 6.3.3 Scherfestigkeit

Mit der Versuchskonfiguration nach DIN EN 15340 können die Scherbeanspruchung und damit die tangentielle Belastung bei thermisch gespritzten Schichten gemessen werden. Die in Abbildung 6-22 schematisch dargestellte Konfiguration wird für die Ermittlung der Scherfestigkeit zwischen 1.2709 und WC/Co in additiv aufgebauten Bauteilen verwendet.

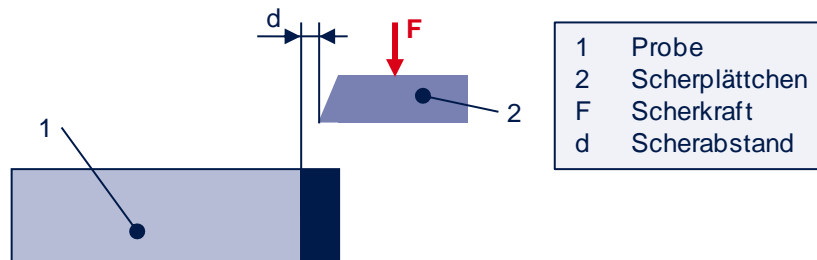


Abbildung 6-22: Versuchskonfiguration für die Ermittlung der Scherfestigkeit nach DIN EN 15340 (DIN EN 15340 2007)

Die Beschichtung des eingespannten Probekörpers (1) wird mittels eines Scherplättchens (2) tangential belastet. Die maximal aufgetretene Scherkraft  $F$  ist in unten dargestellter Tabelle 6-4 aufgeführt. Die Dicke der additiv erzeugten WC/Co-Beschichtung beträgt dabei 300  $\mu\text{m}$ .

Tabelle 6-4: Ermittelte Scherfestigkeitswerte für WC/Co 88/12 (links) und WC/Co 83/17 (rechts)

Probennummer	Substrat	Schicht	F [N]	Probennummer	Substrat	Schicht	F [N]
1	1.2709	WC/Co 88/12	3417	1	1.2709	WC/Co 83/17	3900
2			1952	2			4152
3			5884	3			3246
4			6434	4			6605
5			3245	5			4341

Die untersuchten Probekörper weisen eine hohe Streuung bei den Festigkeitswerten auf. So können auf der einen Seite die Abweichungen nach unten (Probe Nr. 2 bei WC/Co 88/12) durch einen zu großen Abstand  $d_S$  und das daraus folgenden Abgleiten des Scherplättchens von der Probe erklärt werden. Auf der anderen Seite können sehr hohe Scherkräfte (bspw. Probe Nr. 4 für WC/Co 83/17) durch einen zu geringen Abstand  $d_S$  und das damit verbundene Abdriften in den Stahlkörper erklärt werden. Ein Vergleich der WC/Co-Materialien belegt, dass ein erhöhter Co-Anteil die erzielbaren Scherkräfte steigert. Dies ist auf die dadurch erhöhte Duktilität des Hartmetalls zurückzuführen.

### 6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine zweistufige Vorgehensweise vorgestellt, um in einem ersten Schritt die Prozesseignung von Pulverwerkstoffen für den additiven, strahlbasierten Fertigungsprozess zu erforschen (vgl. Abschnitt 6.1). Darauf aufbauend wurden in einem zweiten Schritt die erzeugten Proben hinsichtlich ihrer prozessbedingten Eigenschaften bewertet und mit konventionellen Dick-schichtprozessen verglichen (vgl. Abschnitt 6.2 und 6.3). Das Hartmetall WC/Co 83/17 konnte unter Erreichung einer Restporosität von 2 % und einer Härte von 1287 HV verarbeitet werden. Dies verdeutlicht sich auch in der Verschleißbeständigkeit: Die additiv erzeugten Proben haben einen bis zu 34 % geringeren Materialabtrag als vergleichbare HVOF-beschichtete Einsätze beim Strahlverschleiß.

Die Materialkombination von Stahl 1.2709 und WC/Co 83/17 wurde hinsichtlich der elektrochemischen Beständigkeit sowie der mechanischen Haftfestigkeit untersucht. Der Stoffschluss hat keine negativen Auswirkungen auf die chemische Beständigkeit. Zudem besitzt dieser Haftmechanismus hohe Festigkeitswerte von bis zu 183 N/mm<sup>2</sup>. Der vorgeschlagene multimaterielle Strahlschmelzprozess liefert somit gute technologische Kenngrößen, die es gilt, im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung abschließend zu bewerten (vgl. Kapitel 7).



## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 7.1 Motivation und Vorgehensweise

Dieses Kapitel widmet sich der technisch-wirtschaftlichen Bewertung des additiven, multimateriellen Fertigungsprozesses. Dazu werden in einem ersten Schritt die Referenzen hinsichtlich Prozessen und Bauteilen definiert (vgl. Abschnitt 7.2). Im zweiten Schritt werden die Bewertungsmethodik sowie die Kenngrößen erläutert und es wird die Bewertung der Referenzszenarien durchgeführt (vgl. Abschnitt 7.3). Darauf aufbauend erfolgt im dritten Schritt die technisch und wirtschaftliche Einordnung der Multimaterialverarbeitung (vgl. Abschnitt 7.4). Den Abschluss des Kapitels bildet die Betrachtung zweier industrierelevanter Anwendungsbeispiele für die Multimaterialverarbeitung (vgl. Abschnitt 7.5).

### 7.2 Festlegen der Referenz-Prozesse und -Bauteile

#### 7.2.1 Auswahl der Prozesse

Nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Referenz-Prozesse, die im Weiteren bewertet werden sollen (siehe Abbildung 7-1). Hierfür wurden drei Abläufe ausgewählt.

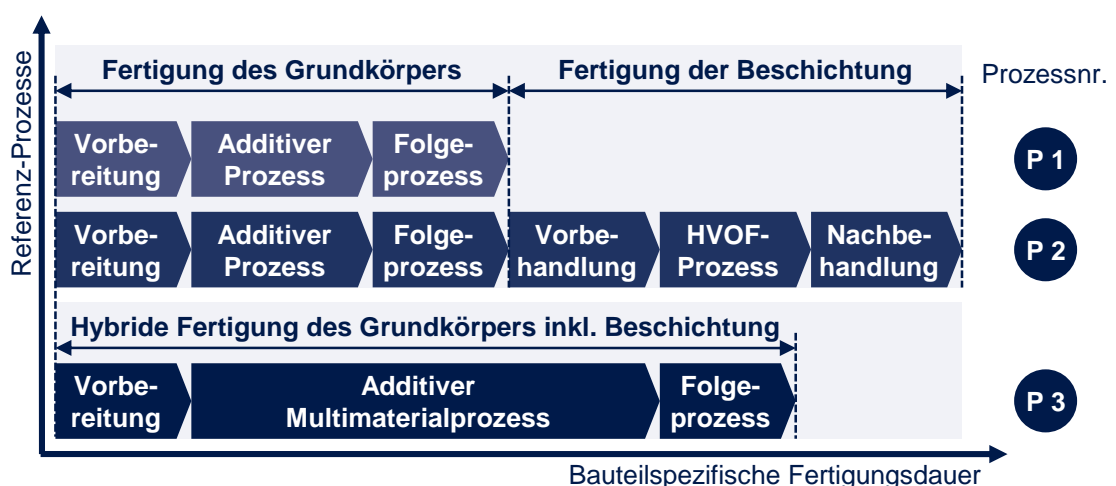


Abbildung 7-1: Bauteilspezifische Fertigungsdauer der ausgewählten Referenz-Prozesse

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im ersten Referenz-Prozess (P 1) wurde das monomaterielle, additive Fertigungsverfahren ohne einen zusätzlichen Beschichtungsprozess gewählt. Dieser setzt sich aus drei Teilprozessen, bestehend aus Vorbereitung und Folgeprozess sowie dem eigentlichen Schichtbauprozess (ZÄH 2006), zusammen. Der zweite Referenz-Prozess (P 2) entspricht dem ersten und wurde um einen HVOF-Beschichtungsprozess erweitert. Diese Ergänzung kann ebenfalls durch eine analoge, dreiteilige und abstrahierte Prozessabfolge beschrieben werden (DIN EN ISO 14921 2009, LUGSCHEIDER 2002). Der dritte Referenz-Prozess (P 3) stellt das multimaterielle, additive Fertigungsverfahren dar. Dieses zeichnet sich durch die Integration des Beschichtungsprozesses in die Bauteilgenerierung aus. Dies hat zur Folge, dass für dieses Verfahren nur drei Prozessschritte bis zum fertigen Bauteil erforderlich sind.

### 7.2.2 Definition der Referenz-Bauteile

Neben der Definition von Referenz-Prozessen werden im Folgenden die verwendeten Referenz-Bauteile spezifiziert, welche in folgender Abbildung zusammengefasst sind (siehe Abbildung 7-2).

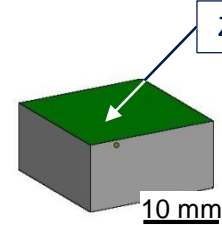
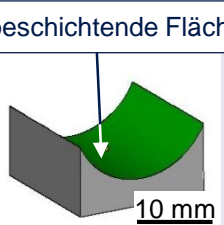
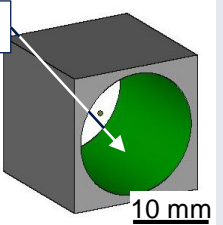
	Quader mit ebener Beschichtung (B 1)	Konkaves Zylindersegment (B 2)	Quader mit Bohrung (B 3)
Isometrische Ansicht des Bauteils			
Abmessung	20 x 20 x 10 mm <sup>3</sup>	20 x 20 x 10,4 mm <sup>3</sup>	20 x 20 x 20 mm <sup>3</sup>
Radius der Beschichtungsfläche	∞	11 mm	8 mm
Anzahl der Schichten	200	208	400
Anzahl der Schichten mit Beschichtungsfläche	1	120	360
Bauteilvolumen	4000,00 mm <sup>3</sup>	2320,83 mm <sup>3</sup>	2910,76 mm <sup>3</sup>
Volumen der Beschichtung	20,00 mm <sup>3</sup>	20,80 mm <sup>3</sup>	36,00 mm <sup>3</sup>
Bauteiloberfläche	1600,00 mm <sup>2</sup>	1549,27 mm <sup>2</sup>	3022,03 mm <sup>2</sup>
Oberfläche der Beschichtung	400,00 mm <sup>2</sup>	408,40 mm <sup>2</sup>	1130,40 mm <sup>2</sup>

Abbildung 7-2: Ausgewählte Bauteile mit einer Beschichtungsfläche, bestehend aus einer Ebene, einem konkaven Zylindersegment und einer Bohrung

Die Auswahl der Bauteile erfolgte unter Variation der geometrischen Komplexität der funktional relevanten Oberfläche. Die projizierte Beschichtungsfläche von 20 x 20 mm<sup>2</sup> ermöglicht es, mehrere Bauteile je Charge additiv herzustellen und so die Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit von den Stückzahlen zu betrachten. Es wurden ein Quader mit ebener Beschichtungsfläche (B 1), ein konkaves Zylindersegment (B 2) sowie ein Quader mit Bohrung (B 3) gewählt. Die beiden letztgenannten Bauteile besitzen jeweils eine konkave Funktionsfläche, wobei die Bohrungsfläche durch die schlechteste Zugänglichkeit und damit höchste Beschichtungskomplexität gekennzeichnet ist. Auf Basis dieser drei Referenzbauteile gilt es, die Referenz-Prozesse zu betrachten und anschließend einander gegenüberzustellen.

### 7.3 Bewertungsmethodik und Kenngrößen

#### 7.3.1 Einleitende Aspekte

Das unternehmerische Handeln wird durch das Spannungsfeld von Qualität, Kosten und Zeit bestimmt (HIELSCHER 2008, ZÄH ET AL. 2010B). Deshalb ist es folgerichtig, die Bewertung der Prozesse in diesem Kontext vorzunehmen. Da sich das vorhergehende Kapitel 6 ausführlich mit der Bewertung der Bauteilqualität befasste, werden die vorliegenden Abschnitte sich auf die Beschreibung der Kosten sowie der Zeit beschränken. Um die Prozesse objektiv miteinander zu vergleichen, werden die Wettbewerbsfaktoren Kosten und Zeit in konkret bewertbare Einheiten gegliedert und mit quantitativen Werten belegt. Dabei wird jeder Referenz-Prozess detailliert betrachtet und unter wirtschaftlich-technischen Gesichtspunkten hinsichtlich der Zielerfüllung der Kriterien beurteilt.

Die detaillierte Bewertung sowie exemplarische Ergebnisse der Bewertungsklassen sind in den Abschnitten 7.3.2 und 7.3.3 zu finden. Die gesamten Tabellen und Berechnungsgrundlagen sind dem Anhang zu entnehmen (vgl. Abschnitte 10.3 bis 10.7).

#### 7.3.2 Bewertungsklasse *Kosten*

Die Bewertungsklasse *Kosten* enthält die monetär erfassbaren Größen. Diese setzen sich aus den Prozesskosten, den Materialkosten sowie den Anteilen des Beschichtungsprozesses an den Gesamtkosten zusammen.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Prozesskosten  $K_{FP}$  lassen sich mit Gleichung 7-1 berechnen. Dabei wird für jeden der  $m$  Teilprozesse (z. B. Beschichtung und Herstellung des Grundkörpers) das Produkt aus der Dauer  $t_{F,m}$  und dem Maschinenstundensatz  $K_{MH,m}$  (VDI 3258, BLATT 1 1962, VDI 3258, BLATT 2 1964) gebildet und aufsummiert:

$$K_{FP} = \sum_1^m K_{MH,m} \cdot t_{F,m}; \quad m = \text{Anzahl der Teilprozesse} \quad (7-1)$$

Die Berechnungsgrundlage für den Maschinenstundensatz der betrachteten Teilprozesse kann dem Anhang (vgl. Abschnitt 10.4) entnommen werden. Die Ermittlung der Fertigungszeiten wird im Abschnitt 7.3.3 erläutert. Die Prozesskosten lassen sich sowohl für die komplette Charge  $K_{FP}$  als auch für die Einzelteile  $k_{FP}$  berechnen. Der formale Zusammenhang wird in Gleichung 7-2 dargestellt:

$$k_{FP} = \frac{K_{FP}}{q}; \quad q = \text{Anzahl der Teile je Charge} \quad (7-2)$$

Der Pulververbrauch in den einzelnen Teilprozessen findet in den Prozesskosten keine Berücksichtigung. Deshalb wurden die Materialkosten je Stück  $k_{MK}$  eingeführt, welche sich aus dem Beschichtungs- oder Bauteilvolumen  $V_{P,n}$ , dem Wirkungsgrad der Teilprozesse  $\eta_{P,n}$  sowie den materialspezifischen Pulverkosten  $K_{P,n}$  zusammensetzen (vgl. Gleichung 7-3). Der prozessbezogene Wirkungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen geförderter und aufgetragener Pulvermasse (LÓPEZ MARTÍNEZ 2008, PARTES 2008):

$$k_{MK} = \sum_1^n V_{P,n} \cdot \eta_{P,n} \cdot K_{P,n}; \quad n = \text{Anzahl der Werkstoffe} \quad (7-3)$$

Die Beschichtungs- sowie die Gesamtbauteilkosten setzen sich aus den Prozesskosten  $k_{FP}$  sowie den Pulverkosten  $k_P$  zusammen. Die betrachteten Kosten sind jeweils auf ein Einzelteil bezogen, sodass sich mit zunehmender Stückzahl je Charge Skaleneffekte (geringere Prozesskosten) ergeben, die die Bauteilkosten reduzieren. Die berechneten Werte aus oben aufgeführten Gleichungen werden in das Kenngrößenfeld übertragen (vgl. Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: *Bewertungsklasse Kosten am Beispiel der multimateriellen additiven Fertigung für das Bauteil*

multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 1		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$k_{FP}$	24,47 €
Materialkosten	$k_{MK}$	5,62 €

Exemplarisch werden in diesem Abschnitt die berechneten Werte für die multi-materielle additive Fertigung für das Referenzbauteil mit ebener Beschichtung dargestellt (vgl. Tabelle 7-1). Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 7.4. Alle weiteren Tabellen der Bewertungsklasse *Kosten* können dem Anhang (Abschnitt 10.3.1) entnommen werden.

### 7.3.3 Bewertungsklasse *Zeit*

Als zweite Bewertungsklasse sind die zeitlichen Kriterien zu nennen. Diese beinhalten die Prozessgeschwindigkeit unter verschiedenen Randbedingungen. So ist die Rüstzeit  $t_V$ , die Fertigungszeit  $t_F$  sowie die Bauteilaufbereitungszeit  $t_N$  zu nennen. Diese drei Zeiten bilden die Dauer der Prozesskette, bestehend aus Vorbereitung, Fertigungsprozess und Nachbereitung, ab. Mit der Dauer der Produktvariation  $t_{pV}$  wird die Flexibilität bei veränderten oder neuen Produkten bewertet.

Die Fertigungszeit lässt sich im Bereich der Strahlschmelzverfahren durch Simulation der Prozesszeiten am Anlagensystem bzw. für das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) unter Verwendung von Auftragsraten und des Beschichtungsvolumens vorherbestimmen (SCHWETZKE ET AL. 2006).

Die Fertigungszeit  $t_F$  bei der Multimaterialverarbeitung setzt sich aus der Beschichtungszeit  $t_p$  und der Belichtungszeit  $t_L$  zusammen (vgl. Gleichung 7-4):

$$t_F = t_p + t_L \quad (7-4)$$

Für die Berechnung der Beschichtungszeit können zwei Ansätze gewählt werden: Zum einen ist dies der punktuelle Pulverauftrag, bei welchem das Auftragsmodul aus nur einer Düse besteht. Es wird jeder Punkt gezielt im Bauraum angefahren und Pulver abgegeben. Die Anzahl der Pulverabgabevorgänge ergibt sich aus dem Quotienten von Konturlänge  $l_p$  und Überlappungsgrad der einzelnen Pulverabgaben  $a_p$ . Wird dieser mit der Dauer einer einzelnen Pulverabgabe  $\Delta t_p$ , der Anzahl der Linien  $n_{Linien}$  sowie der Anzahl an Ebenen  $n_{Ebenen}$  multipliziert, so ergibt sich die Gesamtdauer des Beschichtungsprozesses (vgl. Gleichung 7-5).  $n_{Linien}$  ist die Anzahl der parallel zur Auftragsrichtung gerasterten Konturlinien (siehe Abbildung 4-4, S. 56):

$$t_{p,punktuell} = n_{Ebenen} \cdot n_{Linien} \cdot \frac{l_p}{a_p} \cdot \Delta t_p \quad (7-5)$$

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zum anderen kann durch Parallelisieren einzelner Düsen die Prozesszeit drastisch reduziert und ein zweiter Ansatz des linearen Pulverauftrags berechnet werden. Unter der Voraussetzung, dass alle Düsen gleichzeitig angesteuert werden, kann die Gleichung wie folgt angegeben werden (vgl. Gleichung 7-6):

$$t_{P,linear} = n_{Ebenen} \cdot n_{Linien} \cdot \Delta t_{Linie} \quad (7-6)$$

Die Beschichtungsdauer je Ebene wird durch die Anzahl der gerasterten Konturlinien definiert. Nach dem Schichtauftrag folgt die Verfestigung des Pulvers mittels Laserstrahl. Die Belichtungsdauer wird durch die Konturbreite der Pulverbahn  $b_P$ , den *Hatch*-Abstand der Laserbahnen  $h_L$ , die Länge der Pulverspur  $l_P$ , die *Scan*-Geschwindigkeit des Lasers  $v_L$ , die Quantität der Konturlinien  $n_{Linien}$  sowie die Anzahl der Bauteilebenen  $n_{Ebenen}$  bestimmt (vgl. Gleichung 7-7):

$$t_L = n_{Ebenen} \cdot n_{Linien} \cdot \frac{l_P}{v_L} \cdot \frac{b_P}{h_L} \quad (7-7)$$

Die Rüstzeit  $t_V$ , die Zeit der Bauteilaufbereitung  $t_N$  sowie die Dauer bei Produktvariation  $t_P$  sind geometrieabhängig und werden für die gewählten Referenzbauteile abgeschätzt.

*Tabelle 7-2: Bewertungsklasse Zeit am Beispiel der multimateriellen additiven Fertigung für das Bauteil 1*

multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 1		
Kriterium	Formelzeichen	Wert
Rüstzeit	$t_V$	45 min
Fertigungszeit	$t_F$	< 84 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	90 min
Dauer bei Produktvariation	$t_{PV}$	60 min

Exemplarisch werden in diesem Abschnitt die berechneten Werte für die multimaterielle additive Fertigung für das Referenzbauteil mit der ebenen Beschichtung dargestellt (vgl. Tabelle 7-2). Für die Diskussion der Ergebnisse wird auf Abschnitt 7.4 verwiesen. Alle weiteren Kenngrößenfelder sind in Abschnitt 10.3.2 zu finden.

## 7.4 Technische und wirtschaftliche Einordnung der Multimaterialverarbeitung

### 7.4.1 Fertigungsdauer

Als Grundlage der Fertigungsdauer wird jeweils die gesamte Prozesskette, bestehend aus der Rüstzeit  $t_V$ , der Prozessdauer  $t_F$  sowie der Bauteilaufbereitungszeit  $t_N$ , verwendet (vgl. Gleichung 7-8). Dabei werden sowohl die Dauer des Beschichtungsvorganges als auch die der Grundkörperherstellung einbezogen:

$$t_{Ges} = \frac{t_V + t_F + t_N}{q}; \quad q = \text{Anzahl der Teile je Charge} \quad (7-8)$$

Die berechneten Zeiten können am Beispiel des konkaven Zylindersegments im nachfolgenden Diagramm abgelesen werden (siehe Abbildung 7-3).

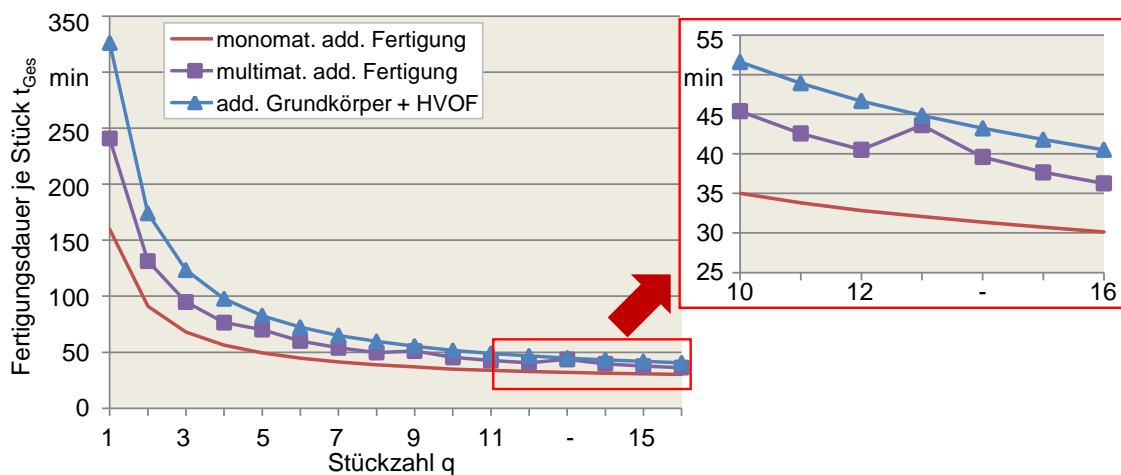


Abbildung 7-3: Bauteilspezifische Fertigungsdauer in Abhängigkeit von der Stückzahl am Beispiel des konkaven Zylindersegments (B 2)

Die Anzahl der gefertigten Bauteile wurde auf 16 festgelegt. Dies ist die maximale Anzahl an Elementen, die mit einer projizierten Grundfläche von  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  auf einer Bauplattformfläche von  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  Platz finden. Für diese Stückzahl verändert sich die Reihenfolge der Fertigungszeiten für die drei Referenz-Prozesse nicht. Werden mehr als 16 Teile gefertigt, so erhöht sich bei allen additiven Prozessen die Zeit  $t_{Ges}$ , da Vor- und Nachbereitung für eine zusätzliche Bauplatte notwendig werden.

### 7.4.2 Gesamtkosten

Die Stückkosten  $k_{Ges}$  ergeben sich aus dem Maschinenstundensatz  $k_{MH}$  für die vor- und nachbereitenden Tätigkeiten an der Anlage sowie dem Stundensatz des/der agierenden Mitarbeiters bzw. Mitarbeiterin  $k_M$ , bezogen auf die Anzahl der Bauteile je Charge. Darüber hinaus werden die Fertigungskosten  $k_{FP}$  je Stück sowie die Materialkosten  $k_{MK}$  hinzuaddiert (vgl. Gleichung 7-9):

$$k_{Ges} = \sum_1^q \frac{(t_V + t_N) \cdot k_M + t_F \cdot k_{MH}}{q} + k_{FP} + k_{MK}; \quad q = \text{Anz. der Teile je Charge} \quad (7-9)$$

Die Berechnungsgrundlage für die Maschinenstundensätze ist dem Anhang zu entnehmen (vgl. Abschnitt 10.4). Als Stundensatz wird gemäß der Qualifikation eines Technikers 40 €/h veranschlagt. Die Aufschlüsselung der Materialkosten kann im Anhang (vgl. Abschnitt 10.5) nachgeschlagen werden. Mit zunehmender Stückzahl reduzieren sich die Kosten je Bauteil, ohne dass die einzelnen Kostenverläufe sich schneiden (siehe Abbildung 7-4).

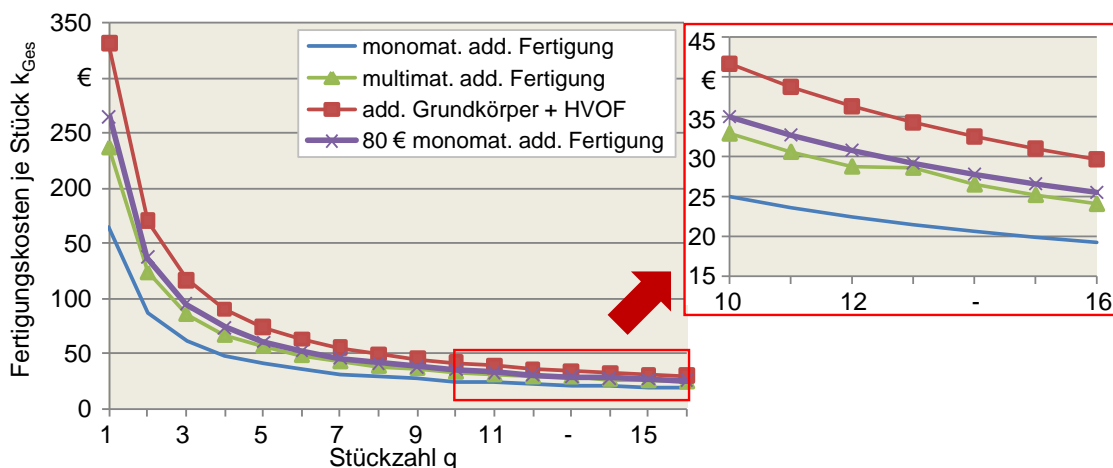


Abbildung 7-4: Bauteilspezifische Fertigungskosten in Abhängigkeit von der Stückzahl am Beispiel des Referenz-Bauteils B 2

Wird der zugrundegelegte Stundensatz von 40 €/h auf 80 €/h verdoppelt, so würden die Gesamtkosten für die Fertigung eines Bauteils für die additiven Verfahren um das 1,6-Fache steigen. Bei den HVOF-Prozessen würden sich die resultierenden Kosten sogar um das 1,8-Fache erhöhen. Obige Sensitivitätsanalyse legt für alle Prozessketten eine hohe Abhängigkeit zwischen Personal- und Gesamtkosten offen. Dieser quantitative Zusammenhang vermindert sich analog zum oben dargestellten Verlauf mit zunehmender Stückzahl.



## 7.4 Technische und wirtschaftliche Einordnung der Multimaterialverarbeitung

Wird keine Beschichtung benötigt, so stellt die monomaterielle additive Fertigung unter den betrachteten Referenz-Prozesse erwartungsgemäß das unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten zu wählende Verfahren dar. Ist die Notwendigkeit einer Beschichtung gegeben, so ist für kleine Stückzahlen die multimaterielle additive Fertigung dem Hochgeschwindigkeits-Flamspritzen vorzuziehen. Sobald mehr als eine Charge im Schichtbauprozess gebaut werden muss, ist die HVOF-Beschichtung, aufgrund von zusätzlichen Kosten für die Vor- und Nachbereitung des additiven Prozesses, für Bauteile mit geringer Komplexität die beste Wahl.

### 7.4.3 Geometrische Bauteilkomplexität

Die Flexibilität eines Fertigungsprozesses ist nicht nur charakterisiert durch die Fähigkeit, unterschiedliche Materialien verarbeiten zu können, sondern auch durch die Vielfalt der Geometrien (vgl. Abschnitt 6.2.7.2), die sich herstellen lassen. Der Einfluss der Bauteilkomplexität wird anhand der multimateriellen additiven Fertigung in Abbildung 7-5 verdeutlicht.

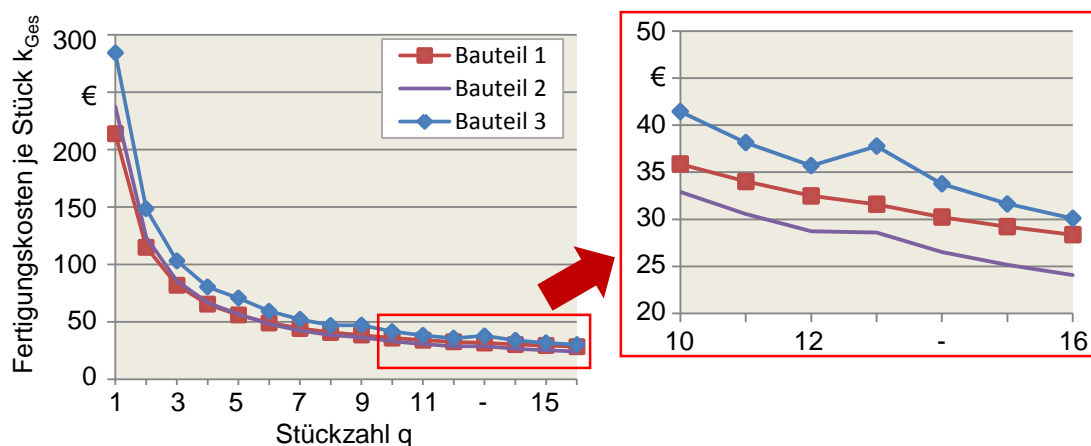


Abbildung 7-5: Einfluss der geometrischen Komplexität der Referenzbauteile auf die Fertigungskosten für den Referenz-Prozess „multimaterielle additive Fertigung“

Werden die 16 Bauteile (B 2) je Grundplatte in vier Zeilen und vier Spalten angeordnet, so verursacht der selektive Pulverauftrag mit jeder neuen Spalte eine Zunahme der Fertigungskosten je Stück, da sich das Auftragsvolumen und damit die Prozesszeit erhöht. Die Fertigungskosten weisen keine Abhängigkeit von der Bauteilkomplexität auf. Die marginalen Unterschiede der Verläufe (z. B. zwischen Bauteil 1 und Bauteil 3) lassen sich vielmehr auf das zunehmende Volu-

men der Referenz-Bauteile zurückführen (siehe Abbildung 7-2). Im Gegensatz zu additiven Fertigungsverfahren ist die Komplexität der Bauteile für konventionelle Dickschichtbeschichtungsprozesse ein wichtiges Entscheidungskriterium (DIN EN 15520 2007). So ist die Beschichtung der Referenzgeometrie „Bohrung“ durch HVOF-Verfahren nur eingeschränkt bzw. nicht möglich. Der kleinste Durchmesser wird je nach Innenbeschichtungsbrenner mit mindestens 250 mm angegeben (MATTHÄUS & STURGEON 2006).

### 7.5 Anwendungsszenarien mit Referenzgeometrie

#### 7.5.1 Einleitende Aspekte

Die abschließende Bewertung zweier industrierelevanter Anwendungen verdeutlicht Einsatzpotentiale des additiven und multimateriellen Schichtbauprozesses. Zum einen wurde aus dem Bereich des Werkzeug- und Formenbaus ein Tiefzieh-Werkzeug gewählt, zum anderen ein Bauteil aus dem Anwendungsbereich der Wasserkraft herausgegriffen. Hierbei handelt es sich um eine abrasiv beanspruchte Pelton-Turbinenschaufel, wie sie in Wasserkraftanlagen Verwendung findet.

#### 7.5.2 Tiefziehwerkzeug

Die Einsatzbereiche und Anwendungsmöglichkeiten der Tiefziehwerkzeuge sind vielseitig. Es lassen sich sowohl Kunststoffe (z. B. Joghurtbecher) als auch Metalle (z. B. Haushaltsformen) verarbeiten. Je nach Konfiguration des tribologischen Systems, welches sich aus der Struktur (z. B. Werkstoffpaarung und weitere Medien) sowie dem Beanspruchungskollektiv (z. B. Belastung, Bewegung, Temperatur) zusammensetzt, tritt Reibung und damit verbunden Verschleiß auf (SOMMER ET AL. 2010). Anhand eines Tiefzieh-Werkzeugs (siehe Abbildung 7-6) für metallische Werkstücke werden die monetären Aspekte des additiven Multimaterialprozesses betrachtet. Der Einsatz von Hartmetallen bei Umformwerkzeugen ist eine sehr weit verbreitete Möglichkeit, den auftretenden abrasiven Verschleiß zu reduzieren und so die Standzeit des Formkörpers zu verlängern (CZICHOS & HABIG 2010).

Tiefzieh-Werkzeug	
Isometrische Ansicht	
min. Bauraumbedarf	100 x 100 x 14 mm <sup>3</sup>
Anzahl der Schichten	280
Anzahl der Schichten mit Beschichtungsfläche	280
Bauteilvolumen	53956,2 mm <sup>3</sup>
Volumen der Beschichtung	2735,8 mm <sup>3</sup>
Bauteiloberfläche	16199,2 mm <sup>2</sup>
Oberfläche der Beschichtung	5471,5 mm <sup>2</sup>
Werkstoff	WC/Co 83/17

*Abbildung 7-6: Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevanten Merkmale des Tiefzieh-Werkzeugs*

Der oben dargestellte Umformring benötigt einen minimalen Bauraum mit den Abmessung 100 x 100 x 14 mm<sup>3</sup>. Das Werkzeug besitzt ein effektives Bauteilvolumen von 53956,2 mm<sup>3</sup> mit einem Beschichtungsvolumen von 2735,8 mm<sup>3</sup>. Die Beschichtungsfläche befindet sich an der Innenseite des Tiefziehringes mit einer Größe von 5471,5 mm<sup>2</sup>. Werden die Werte aus Abbildung 7-6 für die wirtschaftliche Betrachtung zu Grunde gelegt, so können sowohl die Herstellkosten als auch die Herstellzeit berechnet werden. Das oben abgebildete Werkzeug wurde komplett aus WC/Co 83/17 gefertigt. Der Nachweis der Machbarkeit des Multi-materialprozesses erfolgte in Abschnitt 5.4, die zugehörige Haftfestigkeit der Werkstoffkombination ist dem Abschnitt 6.3 zu entnehmen.

Der additive Multimaterialprozess mit zeilenweisem Materialauftrag würde für das oben dargestellte Bauteil  $t_F = 836$  min benötigen. Dabei entfallen 551 min auf die Fertigung des Grundkörpers, 275 min auf den Beschichtungsprozess sowie ca. 10 min auf die Belichtung der Beschichtungsfläche. Werden die Düsen weiter parallelisiert, so können die Zeiten für den Pulverauftrag des Beschichtungsmaterials weiter reduzieren werden. Die hohen Prozesszeiten wirken sich auch auf die Herstellkosten aus.

Wird das Bauteil nach monetären Gesichtspunkten bewertet, so lassen sich die Gesamtkosten  $k_{Ges}$  nach Gleichung 7-9 wie folgt aufgliedern (Tabelle 7-3).

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Tabelle 7-3: Kostenvergleich zwischen dem Multimaterialverarbeitungsprozess und dem HVOF-Beschichtungsprozess für den Tiefziehring

Kostenvergleich für Tiefziehring			
Bezeichnung	Formelzeichen	Multimaterialprozess	HVOF-Beschichtung
Stundensatz Techniker(-in)	$k_M$	40 € / h	
Maschinenstundensatz (Vor- und Nachbereitung)	$k_{MH}$	16,58 €/h	5,53 €/h
Fertigungskosten	$k_{FP}$	240,93 €	189,37 €
Materialkosten	$k_{MK}$	78,63 €	80,16 €

Bei einer angenommenen Vor- und Nachbereitung des einzeln gefertigten Bauteils von ca. 12 Stunden lassen sich für die Multimaterialverarbeitung Gesamtkosten  $k_{Ges}$  von 998,52 € ermitteln. Würde das Bauteil konventionell mit HVOF beschichtet, so entstünden Kosten von  $k_{Ges} = 815,89$  €.

### 7.5.3 Pelton-Turbinenschaufel

Die Hydroenergietechnik gilt als ein innovatives Anwendungsfeld im Bereich der regenerativen Energiegewinnung.

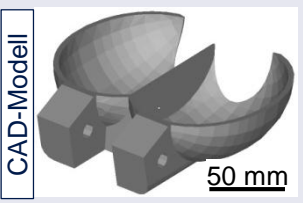
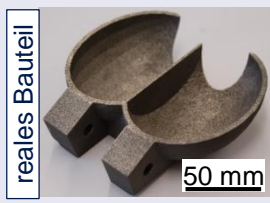
	Pelton-Turbinenschaufel	
Isometrische Ansicht	 CAD-Modell	 reales Bauteil
min. Bauraumbedarf	94,6 x 93,4 x 25 mm <sup>3</sup>	
Anzahl der Schichten	500	
Anzahl der Schichten mit Beschichtungsfläche	480	
Bauteilvolumen	30179,2 mm <sup>3</sup>	
Volumen der Beschichtung	4075,2 mm <sup>3</sup>	
Bauteiloberfläche	19412,5 mm <sup>2</sup>	
Oberfläche der Beschichtung	8150,4 mm <sup>2</sup>	
Werkstoff	WC/Co 83/17	

Abbildung 7-7: Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevante Bauteilangaben der Pelton-Turbinenschaufel

Hier lassen sich unterschiedlichste Anlagen- und Turbinentypen finden. Bei der Pelton-Turbine, die sich aus radial angeordneten Turbinenschaufeln zusammensetzt (siehe Abbildung 7-7), trifft das Fluid mit hoher Geschwindigkeit in der Schaufelmitte auf und wird durch die Form der Schaufeln um  $180^\circ$  umgelenkt. Durch diese gezielte Strahlführung kann die Turbine einerseits sehr hohe Wirkungsgrade erzielen. Auf der anderen Seite ist die Schaufeloberfläche durch den auftreffenden Impuls sowie durch im Wasser enthaltene Verunreinigungen (z. B. Sand) einer starken abrasiven Belastung ausgesetzt.

Auf Grund der hohen Verschleißbelastung bei dem genannten Anwendungsbeispiel sind Beschichtungen unerlässlich, um den Wartungsaufwand zu minimieren und somit die Maschinenverfügbarkeit zu erhöhen bzw. die Wartungskosten zu reduzieren. Als Beschichtungsmaterial haben sich Hartmetalle (z. B. WC/CoCr) als sehr gute Wahl zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit bewährt. Die Wirtschaftlichkeit soll am bereits für den additiven Prozess qualifizierten Werkstoff WC/Co 83/17 verdeutlicht werden.

Die Turbinenschaufel wird, wie in Abbildung 7-7 dargestellt, mit der Schaufelöffnung nach oben aufgebaut. Dadurch kann die Anzahl der Schichten und damit die Fertigungszeit minimiert werden. Die Turbinenschaufel wurde in ihrer Dimension so skaliert, dass der Bauraumbedarf eine Größe von  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  in der Grundfläche nicht überschreitet. Daraus ergeben sich ein Bauteilvolumen von  $4075,2 \text{ mm}^3$  und eine für die Bauteilbeschichtung relevante Oberfläche von  $8150,4 \text{ mm}^2$ . Im Rahmen der Multimaterialverarbeitung wurde für die Berechnung der Beschichtungsdicke eine Schichtstärke von 1 mm vorgegeben. Die verwendeten Prozessparameter zur Herstellung oben gezeigter Schaufel können dem Anhang (vgl. Abschnitt 10.7) entnommen werden.

Der additive Multimaterialprozess dauerte für oben genannte Konfiguration  $t_F = 1173 \text{ min}$ . Dabei entfallen 421 min auf die Fertigung des Grundkörpers, 736 min auf den Beschichtungsprozess mit zeilenweisem Pulverauftrag sowie ca. 15 min auf die Belichtung der Beschichtungsfläche. Die hohe Fertigungszeit kann auf zwei Arten weiter reduziert werden. Einerseits kann die Verringerung des Grundkörpervolumens, z. B. durch Topologieoptimierung, dazu beitragen, die Fertigungszeit zu verringern. Andererseits ist es möglich, durch weiteres Parallelisieren der Auftragsdüsen einen flächigen anstelle eines linearen Pulverauftrags zu realisieren. Ein flächiger Pulverauftrag würde die Auftragsdauer für die Beschichtung auf minimal 8 min reduzieren.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

---

Die Gesamtkosten  $k_{Ges}$  des Bauteils können wie folgt aufgeschlüsselt werden (vgl. Gleichung 7-9, Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: *Kostenvergleich zwischen dem Multimaterialverarbeitungsprozess und dem HVOF-Beschichtungsprozess für die Pelton-Turbinenschaufel*

Kostenvergleich für Pelton-Turbinenschaufel			
Bezeichnung	Formelzeichen	Multimaterialprozess	HVOF-Beschichtung
Stundensatz Techniker(-in)	$k_M$	40 € / h	
Maschinenstundensatz (Vor- und Nachbereitung)	$k_{MH}$	16,58 €/h	5,53 €/h
Fertigungskosten	$k_{FP}$	337,66 €	151,50 €
Materialkosten	$k_{MK}$	46,51 €	48,79 €

Bei einer Vor- und Nachbereitung des einzeln gefertigten Bauteils von ca. 12 Stunden werden durch den Multimaterialprozess die Gesamtkosten  $k_{Ges} = 1063,13$  € verursacht. Würde das Bauteil konventionell mit Hochgeschwindigkeitsflammspritzen beschichtet werden, so entstünden Kosten von  $k_{Ges} = 746,65$  €.

### 7.6 Zusammenfassung

Basierend auf der eingeführten Bewertungsmethodik wurden drei Referenzprozesse hinsichtlich der Kenngrößen *Kosten* und *Zeit* bewertet. Kann auf eine Beschichtung verzichtet werden, so ist die monomaterielle, additive Fertigung unter Berücksichtigung der postulierten Kriterien das zu wählende Verfahren. Ist die Notwendigkeit einer Beschichtung gegeben, so ist die Prozesswahl von der zu fertigenden Stückzahl sowie der Komplexität abhängig. Nachfolgende Grafik fasst die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammen (siehe Abbildung 7-8).

Der erforschte Multimaterialprozess kann für Bauteile mit hoher geometrischer Komplexität (z. B. innenliegende Funktionsflächen) und für Bauteile in geringer Stückzahl wirtschaftlich angewendet werden. Steigt die Stückzahl und damit die zu beschichtende Fläche, gewinnen die konventionellen Beschichtungsprozesse (hier: HVOF) an Bedeutung. Der Übergang zwischen den Beschichtungsverfahren ist fließend.

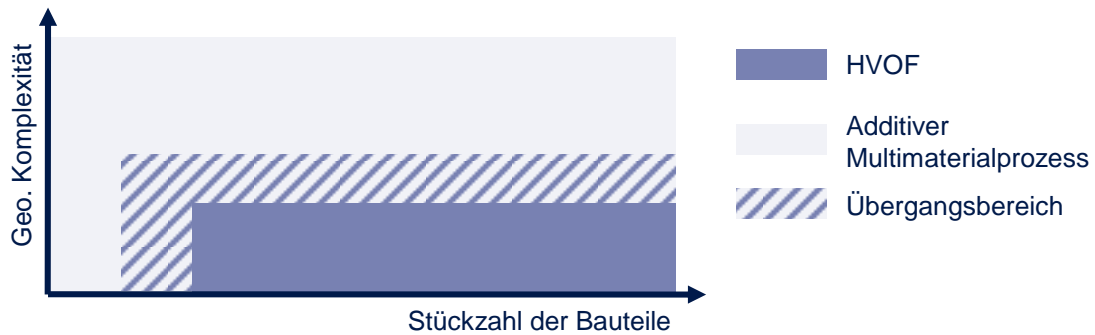


Abbildung 7-8: Anwendungsbereich der additiven, strahl- und pulverbettbasierten Multimaterialverarbeitung sowie des HVOF

Nach der systematischen Bewertung der Referenz-Prozesse anhand definierter Referenzgeometrien wurde die industrielle Relevanz des additiven Multimaterialprozesses anhand zweier ausgewählter Anwendungsbeispiele dargestellt. Es zeigte sich, dass das Verfahren wegen der hohen Kosten sowie der langen Fertigungsdauer der gewählten Beispiele weiteres Optimierungspotential besitzt. So kann durch zunehmendes Parallelisieren der Auftragsdüsen die Fertigungszeit deutlich reduziert werden. Im abschließenden Kapitel 8 werden die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst.





# 8 Schlussbetrachtung

## 8.1 Zusammenfassung

Die sog. Megatrends führen zu grundlegenden Veränderungen bei produzierenden Unternehmen. Die Produktlebenszyklen verkürzen sich und die Produktvarianten werden zahlreicher. Die Individualisierung der Produkte führt zu einer Zunahme der Bauteilkomplexität und zu einer Reduktion der Losgrößen. Diese geänderten Rahmenbedingungen wirken sich unmittelbar auf die Fertigungsprozesse aus (vgl. Kapitel 1). Mit additiven Fertigungsverfahren können Kleinserien komplexer Produkte wirtschaftlich und schnell hergestellt werden. Bislang können jedoch zwei oder mehr Materialien je Schicht nicht verarbeitet werden, wodurch die Flexibilität der Verfahren limitiert wird. Die Herausforderung für diese Arbeit bestand in der Erforschung der Multimaterialverarbeitung bei der additiven, strahl- und pulverbettbasierten Fertigung, mit dem Ziel, Bauteil und Beschichtung integriert herzustellen.

In einem ersten Schritt fand die systematische Einführung in die Grundlagen der additiven Fertigung sowie der Schüttguttechnik mit der Zielsetzung statt, ein durchgängiges Verständnis der Strahlschmelzprozesse sowie der Pulverwerkstoffe zu erarbeiten (vgl. Kapitel 2). Dazu erfolgten die Beschreibung des Prozessablaufs der Schichtbauverfahren sowie die Einordnung der Prozessvarianten in Abhängigkeit von den Verfestigungsmechanismen. Die Zielsetzung der Multimaterialverarbeitung mittels selektiven Pulverauftrags erforderte darüber hinaus auch eine tiefgreifende Charakterisierung der Pulvereigenschaften, insbesondere der vorherrschenden Kräfte und Spannungen. Aufbauend auf den Grundlagen beinhalteten die Betrachtungen zum Stand der Forschung und Technik (vgl. Kapitel 3) die bisherigen Arbeiten in den Bereichen der Schüttguttechnik sowie der additiven Prozesse. Der abgeleitete Handlungsbedarf verdeutlicht noch ungenutztes Potential bei der Prozessgestaltung zur flexiblen Multimaterialverarbeitung.

Kapitel 4 fokussierte sich darauf, ein Prozessmodell zur Beschreibung des Multimaterialprozesses zu erarbeiten. Darin wurde die Abfolge der Subprozesse bzw. der globale Prozessablauf durch ein übergeordnetes Prozessmodell definiert. In der nächsttieferliegenden Hierarchiestufe folgten einzelne wiederkehrende Einheiten, die zu den Subprozessen zusammengefasst wurden. Die Einführung sowohl des selektiven Auftragsprozesses als auch des selektiven Aufschmelzpro-

## 8 Schlussbetrachtung

---

zesses ermöglichte die Multimaterialverarbeitung. Zur weiteren Flexibilisierung des additiven Fertigungsprozesses wurde eine steuerbare Heizung integriert. Durch die vorgeheizte Grundplatte konnten signifikante Qualitätsverbesserungen bei der Verarbeitung von Wolframkarbid-Kobalt beobachtet werden.

Kapitel 5 widmete sich der Ausgestaltung des Subprozesses *selektives Pulverauftragen* als Voraussetzung zur Multimaterialverarbeitung. Die systematische Bewertung der Fließfähigkeit bildete die Grundlage zur Modellierung der Pulvereigenschaften. Zielsetzung der Modellierung war es, das Pulvervolumen zu minimieren. Der entwickelte Trichterversuch machte die Fließfähigkeit bei unterschiedlichen Bohrungsdurchmessern quantifizierbar. Die Korrelation der pulver-spezifischen Kräfte mit dem Düsendurchmesser (0,4 mm) belegt, dass der Pulverfluss bereits dann zum Erliegen kommt, wenn der Durchmesser der Düse kleiner oder gleich dem Zehnfachen des Pulverkorndurchmessers (0,04 mm) ist. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde in einem ersten Schritt ein Auftragsmechanismus konzipiert. In Kombination mit dem bereits erarbeiteten Prozessmodell wurde ein erstes einfaches Multimaterialbauteil, bestehend aus Stahl (1.2709) und Hartmetall (WC/Co), aufgebaut und damit die Machbarkeit des Prozessablaufs bestätigt.

Kapitel 6 war darauf ausgerichtet, die Prozesseignung von Pulverwerkstoffen sowie die daraus resultierenden Bauteileigenschaften zu bewerten. Dabei wurden ein- und zweidimensionale Körper unter Variation der *Scan*-Geschwindigkeit sowie der Laserleistung aufgebaut und die Prozessfenster für Stahl und Hartmetall ermittelt. Darauf basierend erfolgte die systematische Bewertung der generierten Volumenkörper. Diese beinhaltete die Charakterisierung der prozessbedingten Bauteileigenschaften. Die Qualität der lasergenerierten Hartmetallbeschichtung konnte durch einen Vergleich mit einer äquivalenten, thermisch gespritzten Schicht nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurden die elektrochemische Beständigkeit und die mechanische Festigkeit der Werkstoffkombination bewertet. Diese Ergebnisse geben das Potential des multimateriellen Schichtbauprozesses wieder.

Neben den technischen Eigenschaften ist auch die Wirtschaftlichkeit des Multimaterialprozesses für die spätere Nutzung des Verfahrens entscheidend. Deshalb wurden das thermische Spritzen (HVOF), der monomaterielle Strahlschmelzprozess und die Multimaterialverarbeitung miteinander verglichen. Es wurde verdeutlicht, dass für geringe Stückzahlen und komplexe Bauteile eine wirtschaftliche Fertigung durch den additiven, strahl- und pulverbettbasierten Multimaterial-

prozess möglich ist. Anhand zweier industrierelevanter Beispiele, ein Tiefzieh-Werkzeug und eine Pelton-Turbinenschaufel, wurde der Anwendungsbezug hergestellt.

### 8.2 Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten

Die Verarbeitung von mehreren Werkstoffen zu einem Multimaterialbauteil eröffnet neue Möglichkeiten und Anwendungsfälle für die additiven Fertigungsverfahren, liefert aber gleichzeitig auch neue Herausforderungen, die es von zukünftigen Forscherinnen und Forschern zu meistern gilt.

Der entwickelte Auftragsmechanismus hat sich für die integrierte Herstellung von Bauteil und Beschichtung bewährt. Dabei baut das Prinzip auf die Fließfähigkeit des Pulversystems auf. Mit verminderter Fließfähigkeit reduziert sich folglich auch die Auftragsgenauigkeit. In diesem Zusammenhang gilt es zukünftig die Eignung von kohäsiven Materialpartikeln für den selektiven Pulverauftrag zu analysieren. Die damit einhergehende Flexibilisierung des Materialauftrags macht weitere Werkstoffkombinationen für die Industrie zugänglich.

Überdies sind neue Wege beim Beschichten von zwei Flächen zu beschreiten. Die Optimierung des Auftragsmoduls wurde für Beschichtungen und damit für kleine Volumenanteile am Bauteilvolumen durchgeführt. Um größere Anteile mehrerer Materialien aufzutragen, ist ein flächiger Pulverauftrag zu entwickeln, der durch höhere Prozessgeschwindigkeiten die Wirtschaftlichkeit steigert.

Zur Verbesserung der Qualität bei Multimaterialbauteilen sind die Wirkmechanismen des Strahlschmelzens bei Werkstoffübergängen intensiv zu betrachten. Diese sind bislang noch unzureichend erforscht. Die stoffschlüssige Verbindung resultiert aus der Durchmischung der Werkstoffe in der sog. intermetallischen Zwischenschicht, welche durch die Prozessparameter gezielt manipuliert werden kann. Dieser Übergang lässt sich sowohl abrupt als auch gradiert gestalten, wodurch die Kombination von schwer verbindbaren Materialien ermöglicht werden kann. Bei einem ausreichenden Prozessverständnis können zukünftig Überwachungsmechanismen zur Bewertung der intermetallischen Schicht erforscht werden, um die Bauteilqualität und damit die Prozessrobustheit zu steigern.

Die Kombination weiterer Werkstoffe stellt ein weiteres zukünftiges Handlungsfeld dar. So gilt es neue Materialien für den Strahlschmelzprozess zu qualifizie-

## 8 Schlussbetrachtung

---

ren und so die Potentiale der additiven Fertigungsverfahren weiter auszuschöpfen. Die funktionsgerechte Bauteilgestaltung und somit auch die Materialauswahl gewinnen durch die Forderung nach mehr Ressourceneffizienz weiter an Bedeutung. Durch funktionsorientierte Multimaterialbauteile können weitere Einsparungen erzielt werden. Die werkstoffkundlichen Wechselwirkungen der Mehrkomponentensysteme sind systematisch zu erfassen und zu bewerten.

Mit der vorliegenden Arbeit wurden erste Grundlagen zur Multimaterialverarbeitung bei der additiven, strahl- und pulverbettbasierten Fertigung erforscht. Durch die konsequente Weiterentwicklung des Auftragsprinzips sowie die Qualifizierung neuer Werkstoffkombinationen kann die Flexibilität der metallischen Schichtbauverfahren weiter ausgebaut werden. Die Arbeit ist daher als Leitfaden für zukünftige Arbeiten aus dem Bereich der Multimaterialverarbeitung zu sehen.

## 9 Literaturverzeichnis

ABELE 2010

Abele, E.: Herausforderungen für die Produktion(sforschung) 2020.  
Karlsruhe: 10.03.2010.

ABELE & REINHART 2011

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

ADER 2002

Ader, C.: Direktes Lasersintern keramischer Feingusskomponenten. (Hrsg.):  
Rapid prototyping & tooling (Potentiale - Erfahrungen - Praxisbeispiele - Trends;  
Tagung Duisburg 26. September 2002). Düsseldorf: VDI-Verlag 2002, S. 55-68.  
ISBN: 3-18091-686-9.

AKERS 1992

Akers, R. J.: The certification of a limestone powder for Jenike shear testing:  
CRM 116. Brüssel, Belgien: Commission of the European Communities 1992.  
ISBN: 9-28263-498-1.

ALEXANDRE 2007

Alexandre, T.: Solid freeform fabrication of porous ceramic parts from ceramic  
powders and preceramic polymers. Diss. École polytechnique federale de Lau-  
sanne. Lausanne, Schweiz (2007).

AL-JAMAL ET AL. 2008

Al-Jamal, O. M.; Hinduja, S.; Li, L.: Characteristics of bond in Cu-H13 tool steel  
parts fabricated using SLM. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008)  
1, S. 239-242.

ALLEN ET AL. 2008

Allen, M. L.; Aronniemi, M.; Mattila, T.; Alastola, A.; Ojanperä, K.; Suhonen,  
M.; Seppä, H.: Electrical sintering of nanoparticle structures. Nanotechnology 19  
(2008) 17, S. 1-4.

ASTM E1461 2007

ASTM E1461: Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash  
Method. West Conshohocken, USA: ASTM 2007.

ASTM B213-97 1998

ASTM B213-97: Standard Test Method for Flow Rate of Metal Powders. West  
Conshohocken, USA: ASTM 1998.

BAKKELUND 1997

Bakkelund, J.: Fabrication layers of loose powder for layer manufacturing tech-  
nology. Diss. NTNU Trondheim. Trondheim, Norwegen (1997).

BARAT CARBIDE 2011

Barat Carbide: Tungsten Carbide Grades. <[http://www.e6.com/en/media/e6/content/pdf/Barat\\_Carbide\\_Group\\_Grades.pdf](http://www.e6.com/en/media/e6/content/pdf/Barat_Carbide_Group_Grades.pdf)> - 30.05.2011.

### BAUMBERGER 2007

Baumberger, G. C.: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. Diss. Technische Universität München (2007). München: Dr. Hut 2007. ISBN: 978-3-89963-660-4.

### BECKER ET AL. 2009

Becker, D.; Meiners, W.; Wissenbach, K.: Additive Manufacturing of Copper a Alloy by Selective Laser Melting. In: Ostendorf, A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. München 2009, S. 195-199. ISBN: 978-3-00027-994-2.

### BELL ET AL. 1995

Bell, T. A.; Grygo, R. J.; Duffy, S. M.; Puri, V. M.: Simplified methods of measuring powder cohesive strength. Nürnberg: 21.-23.03.1995.

### BERNS 1998

Berns, H. (Hrsg.): Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe. Berlin, Heidelberg: Springer 1998. ISBN: 3-54062-925-4.

### BERTRAM & SCHEMMER 1985

Bertram, W.; Schemmer, M.: Haftfestigkeit von Metallschichten auf Stählen bei statischer und wechselnder Beanspruchung. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 16 (1985) 1, S. 1-12.

### BEYER & WISSENBACH 1998

Beyer, E.; Wissenbach, K.: Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung. Berlin: Springer 1998. ISBN: 3-54063-224-7. (Laser in Technik und Forschung).

### BLAZDELL & EVANS 1999

Blazdell, P. F.; Evans, J. R.: Preparation of Ceramic Inks for Solid Freeforming Using a Continuous Jet Printer. Journal of Materials Synthesis and Processing 7 (1999) 6, S. 349-356.

### BOIVIE ET AL. 2006

Boivie, K.; Karlsen, R.; van der Eijk, C.: Material Issues of the Metal Printing Process, MPP. Austin, USA: 14.-16.08.2006.

### BOURELL ET AL. 2009

Bourell, D. L.; Leu, M. C.; Rosen, D. W.: Roadmap for additive manufacturing. <<http://www.wohlersassociates.com/roadmap2009.pdf>> - 16.06.2010.

### BRANNER 2010

Branner, G.: Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren. Diss. Technische Universität München. München (2010).

### BREUN 2006

Breun, F.: Produktionsstandort Deutschland: Stärken und Herausforderungen. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Tagungsband. München: Utz 2006, S. 23-37. ISBN: 3-83160-575-0.

COREMANS 1999

Coremans, A. L.: Laserstrahlsintern von Metallpulver. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (1999). Bamberg: Meisenbach 1999. ISBN: 3-87525-124-5. (Fertigungstechnik Erlangen 93).

CZICHOS & HABIG 2010

Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. 3., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-83480-017-6.

DAS & SANTOSA 2001

Das, S.; Santosa, J.: Design of a micro-hopper array for multi-material powder deposition. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Proceedings. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher 2001, S. 155-162.

DIMETER & MAYER 2009

Dimeter, M.; Mayer, R.: Laserlegieren mit dem Werkstoff 1.2709. <[http://www.lasergenerieren.de/upload/lbc\\_lasergenerieren\\_materialdatenblatt\\_1\\_2709.pdf](http://www.lasergenerieren.de/upload/lbc_lasergenerieren_materialdatenblatt_1_2709.pdf)> - 01.02.2011.

DIN 1055, TEIL 6 2005

DIN 1055, Teil 6: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter. Berlin: Beuth 2005.

DIN 30905 1998

DIN 30905: Thermophysikalische Eigenschaften von Hartmetallen - Messung der Temperaturleitfähigkeit mit der Laserflash-(Wärmeimpuls-) Methode. Berlin: Beuth 1998.

DIN 51936 2008

DIN 51936: Prüfung von Kohlenstoffmaterialien - Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit bei hohen Temperaturen nach dem Laser-Impuls-Verfahren. Berlin: Beuth 2008.

DIN 50919 1984

DIN 50919: Korrosionsuntersuchungen der Kontaktkorrosion in Elektrolytlösungen. Berlin: Beuth 1984.

DIN EN 15340 2007

DIN EN 15340: Thermisches Spritzen - Bestimmung des Scherbeanspruchungswiderstandes bei thermisch gespritzten Schichten. Berlin: Beuth 2007.

DIN EN 582 1994

DIN EN 582: Ermittlung der Haftzugfestigkeit. Berlin: Beuth 1994.

DIN EN 821 2005

DIN EN 821: Hochleistungskeramik - Monolithische Keramik - Thermophysikalische Eigenschaften. Berlin: Beuth 2005.

DIN EN 15520 2007

DIN EN 15520: Thermisches Spritzen - Empfehlungen zum konstruktiven Gestalten von Bauteilen mit thermisch gespritzten Schichten. Berlin: Beuth 2007.

## Literaturverzeichnis

---

DIN EN ISO 14921 2009

DIN EN ISO 14921: Thermische Spritzen - Vorgehen für das Anwenden thermischer Spritzschichten für Bauteile im Maschinenbau. Berlin: Beuth 2009.

DIN EN ISO 3327 2009

DIN EN ISO 3327: Hartmetalle - Bestimmung der Biegebruchfestigkeit. Berlin: Beuth 2009.

DIN EN ISO 4499, TEIL 1 2010

DIN EN ISO 4499, Teil 1: Hartmetalle - Metallographische Bestimmung der Mikrostruktur - Teil 1: Gefügebilder und Beschreibung. Berlin: Beuth 2010.

DIN ISO 3878 1991

DIN ISO 3878: Vickers-Härteprüfung. Berlin: Beuth 1991.

DIN ISO 4324 1983

DIN ISO 4324: Pulver und Granulate. Berlin: Beuth 1983.

DOLL ET AL. 2009

Doll, R.; Partes, K.; Vollertsen, F.: Friction Measurements on Graded Metal Matrix Composites Generated by Selective Laser Melting. In: Ostendorf, A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. München 2009, S. 189-194. ISBN: 978-3-00027-994-2.

DOMACK & BAUGHMAN 2004

Domack, M. S.; Baughman, J. M.: Development of Nickel-Titanium graded composition components. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Proceedings. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher 2004, S. 655-668.

DUDENREDAKTION 2003

Dudenredaktion: Das große Fremdwörterbuch. 4., aktualisierte Aufl. Mannheim: Dudenverlag 2003. ISBN: 3-41104-164-1.

EISEN 2009

Eisen, M. A.: Optimierte Parameterfindung und prozessorientiertes Qualitätsmanagement für das Selective-Laser-Melting-Verfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen (2009). Aachen: Shaker 2009. ISBN: 978-3-83228-827-3.

ENGELN ET AL. 2007

Engeln, J.; Gehrke, B.; Legler, H.; Licht, G.; Rammer, C.; Schmoch, Ulrich: Bericht zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands 2007.

<[http://www.bmbf.de/pub/tif\\_2007.pdf](http://www.bmbf.de/pub/tif_2007.pdf)> - 05.01.2011.

EXNER ET AL. 2006

Exner, H.; Hartwig, L.; Steek, A.; Horn, M.; Klötzer, S.; Ebert, R.; Regenfuss, P.: Lasermikrosintern von keramischen Materialien. <[http://www.rtejournal.de/ausgabe3/347/\\_06\\_Lasermikrosintern%20von%20keramischen%20Materialien.pdf](http://www.rtejournal.de/ausgabe3/347/_06_Lasermikrosintern%20von%20keramischen%20Materialien.pdf)> - 22.10.2008.



FAULSTICH ET AL. 2010

Faulstich, M.; Köglmeier, M.; Leipprand, A.; Mocker, M.: Perspektiven für eine ressourceneffiziente Industriegesellschaft. In: Teipel, U. (Hrsg.): Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen. Stuttgart Fraunhofer 2010, S. 9-32.

ISBN: 978-3-8396-0097-9.

FEISE 1996

Feise, H. J.: Modellierung des mechanischen Verhaltens von Schüttgütern. Diss. Technische Universität Braunschweig (1996). Braunschweig: Inst. für Mechanische Verfahrenstechnik 1996. ISBN: 3-92039-522-0. (Braunschweiger Schriften zur Mechanik 23-1996).

FRANKEN & MARTENS 1988

Franken, H.; Martens, P.: Silo-Handbuch. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag 1988.

ISBN: 3-43301-037-4.

FÜTTERER 1991

Fütterer, G.: Untersuchungen zum Schnellen Fließen von trockenen, kohäsionslosen Schüttgütern in konvergenten Schächten. Diss. Universität Fridericiana Karlsruhe. Karlsruhe (1991).

GEBHARDT 2007

Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren (Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing). 3. Aufl. München: Hanser 2007.

ISBN: 978-3-44622-666-1.

GEIGER ET AL. 2003

Geiger, M.; Dueck, J.; Niebling, F.; Neeße, T.: Post-Treatment of Direct Metal Laser Sintered Parts by Infiltration Process. In: Assovskiy, I.G.; Haidn, O. (Hrsg.): Space Challenge in the 21st Century, (2003), Moscow, Kaluga: The Russian Academy of Sciences, S. 126-127

GERMAN 1984

German, R. M.: Powder metallurgy science. Princeton, USA: Metal Powder Industries Federation 1984. ISBN: 0-91840-460-6.

GIBSON ET AL. 2009

Gibson, I.; Stucker, B.; Rosen, D. W.: Additive Manufacturing Technologies. New York, USA: Springer Dec. 2009. ISBN: 978-1-44191-119-3.

GLADEN 1985

Gladen, W.: Numerische Untersuchung der Lasten in Silozellen beim exzentrischen Entleeren. Diss. Universität Karlsruhe. Karlsruhe (1985).

GLÄSER & KLOCKE 2009

Gläser, T.; Klocke, F.: Rapid Manufacturing of Hybrid Tools Made of Tool Steel and Tungsten Carbide-Cobalt. Aachen: 02.-04.06.2009.

GLÄSER ET AL. 2008

Gläser, T.; Klocke, F.; Demmer, A.: Liquid-Phase sintering of tungsten Carbide-Cobalt by laser radiation. Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis 2008. Haifa, Israel: 07.-09.07.2008.

### GLÄSER 2010

Gläser, T.: Untersuchungen zum Lasersintern von Wolframkarbid-Kobalt. Diss. RWTH Aachen (2010). Aachen: Apprimus-Verlag 2010. ISBN: 978-3-86359-000-0. (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 2010/21).

### GODA & EBERT 2005

Goda, T. J.; Ebert, F.: Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. Powder Technology 158 (2005) 1-3, S. 58-68.

### GODLINSKI 2005

Godlinski, D.: Die Herstellung metallischer Bauteile bzw. Werkzeugeinsätze mit Hilfe des neuen Rapid-Prototyping Verfahren ProMetal 3D-Printing. <[http://www.rm-platform.com/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=5](http://www.rm-platform.com/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=5)> - 22.01.2009.

### GRENDA 1994

SCHUTZRECHT: US 006206672 Patent (2001-03-27). Grenda, E. P. Pr.: 08/220,889 1994-05-31. Grenda, E. P.: Apparatus of fabricating 3 dimensional objects by means of electrophotography, ionography or a similar process.

### GROSS ET AL. 2009

Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wal, W. A.: Technische Mechanik 2. 10., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-64200-564-0.

### HAACK 1974

Haack, A.: Dämpfungsverhalten ultrafeiner, kohäsiver Pulver beim langsamen, reibungsbehafteten Fließen. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Magdeburg (1974).

### HABIG 1980

Habig, K.-H.: Verschleiß und Härte von Werkstoffen. München: Hanser 1980. ISBN: 3-44612-965-0.

### HAFF 1983

Haff, P. K.: Grain flow as a fluid-mechanical phenomenon. Journal of Fluid Mechanics 134 (1983), S. 401-430.

### HAMAKER 1937

Hamaker, H. C.: The London - van der Waals attraction between sperical particles. Physica 4 (1937) 10, S. 1058-1072.

### HAMPE 1987

Hampe, E.: Silos. 1. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen 1987. ISBN: 978-3-34500-185-7.

### HÄUßLER 1984

Häußler, U.: Geschwindigkeits- und Spannungsfelder beim Entleeren von Silozellen. Diss. Universität Karlsruhe. Karlsruhe (1984).

### HERZOG 2000

SCHUTZRECHT: DE 10042134C2 Patent (2003-06-12). Concept Laser GmbH. Pr.: 10042134.2-16 2000-08-28. Herzog, F.: Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Sinter-Werkstücken.

HERZOG 2002

SCHUTZRECHT: DE 10229952A1 Patentanmeldung (2004-01-15). Concept Laser GmbH. Pr.: 10229952.8 2002-07-03. Herzog, F.: Metallisches Werkstück sowie Verfahren zur Herstellung eines metallischen Werkstückes.

HIELSCHER 2008

Hielscher, T.: Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten. Diss. Technische Universität Kaiserslautern (2008): Technische Universität 2008. ISBN: 978-3-93943-274-6. (Produktionstechnische Berichte aus dem FBK 03/2008).

HILLER & LIPSON 2009A

Hiller, J. D.; Lipson, H.: Fully recyclable multi-material printing. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Proceedings 2009. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher 2009, S. 98-106.

HILLER & LIPSON 2009B

Hiller, J. D.; Lipson, H.: STL 2.0: a proposal for a universal multi-meter additive manufacturing file format. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Proceedings 2009. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher 2009, S. 266-278.

HOFFMANN 2003

Hoffmann, H.: Visionen ins Visier genommen - Die Hochschule als Bindeglied zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. In: Zäh, M. F. (Hrsg.): Grenzen überwinden - Wachstum der neuen Art. München: Utz 2003, S. 53-57. ISBN: 978-3-83160-222-3.

HÖRTEIS ET AL. 2007

Hörteis, M.; Mette, A.; Richter P. L.; Glunz, S. W.: Further Progress in Metal Aerosol Jet Printing for Front Side Metallization of Silicon Solar Cells. <[http://www.ise.fhg.de/veroeffentlichungen/konferenzbeitraege/2007/22nd-european-photovoltaic-solar-energy-conference-and-exhibition-milano-italy-2007/further-progress-in-metal-aerosol-jet-printing-for-front-side-metallization-of-silicon-solar-cells/at\\_download/file](http://www.ise.fhg.de/veroeffentlichungen/konferenzbeitraege/2007/22nd-european-photovoltaic-solar-energy-conference-and-exhibition-milano-italy-2007/further-progress-in-metal-aerosol-jet-printing-for-front-side-metallization-of-silicon-solar-cells/at_download/file)> - 10.10.2008.

HUFTLESS 2005

Huftless, J.: TRUMPF Laserformen - Anwendung additiver Laserverfahren für den Werkzeug- und Formenbau. <[http://www.rtejournal.de/ausgabe2/103/Huftless\\_Trumpf\\_Laserformen\\_Anwendung\\_additiver\\_Laserverfahren.pdf](http://www.rtejournal.de/ausgabe2/103/Huftless_Trumpf_Laserformen_Anwendung_additiver_Laserverfahren.pdf)> - 23.10.2008.

HUI ET AL. 1984

Hui, K.; Haff, P. K.; Ungar, J. E.; Jackson, R.: Boundary conditions for high shear grain flows. Journal of Fluid Mechanics 145 (1984), S. 223-233.

INCROPERA & DEWITT 2002

Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.: Fundamentals of heat and mass transfer. 5. Aufl. New York, USA: Wiley-VCH 2002. ISBN: 0-47138-650-2.

JANSSEN 1895

Janssen, H. A.: Versuche über Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 39 (1895) 35, S. 1045-1049.

JENIKE 1961

Jenike, A. W.: Gravity flow of bulk solids (Eng. Exp. Station Bull. No. 108) University Utah. Salt Lake City, USA (1961).

JENIKE 1964

Jenike, A. W.: Storage and flow of solids (Eng. Exp. Station Bull. No. 108) University Utah. Salt Lake City, USA (1964).

JOHNSON 1998

Johnson, R. W.: The handbook of fluid dynamics. Chemical Rubber Company. Boca Raton: CRC Press 1998. ISBN: 0-84932-509-9.

KARLSEN 1998

Karlsen, R.: Consolidation of thin powder layers for layer manufacturing technology. Diss. NTNU Trondheim. Trondheim, Norwegen (1998).

KARLSEN & BAKKELUND 2002

SCHUTZRECHT: WO 2004/037469A1 Patent (2004-05-06). SINTEF. Pr.: PCT/NO2003/000351 2002-10-23. Karlsen, R.; Bakkelund, J.: Method and Apparatus for Rapid Manufacturing of Metal, Ceramic and Metal-Ceramic Products.

KARLSSON ET AL. 1998

Karlsson, T.; Klinsinski, M.; Runesson, K.: Finite element simulation of granular material flow in plane silos with complicated geometry. Powder Technology 99 (1998) 1, S. 29-39.

KELLER 1988

Keller, H.: Beiträge zum Schüttgutausfluß aus Behältern. Diss. Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar. Weimar (1988).

KELLER ET AL. 1993

SCHUTZRECHT: DE 4326989C1 Patent (1994-12-22). EOS GmbH Electro Optical Systems GmbH. Pr.: P4326986.9-16 1993-08-11. Keller, P.; Wilkening, C.; Retallick, D.; Langer, H. J.: Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von dreidimensionalen Objekten.

KLOCKE & WAGNER 2002

Klocke, F.; Wagner, C.: Direct Selective Laser Sintering of Superalloys. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Proceedings. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher 2002, S. 187-198.

KLOCKE ET AL. 2003

Klocke, F.; Wagner, C.; Ader, C.: Development of an integrated model for selective laser sintering. In: Bley, H. (Hrsg.): Proceedings. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes Lehrstuhl für Fertigungstechnik 2003, S. 387-392.

ISBN: 3-93042-958-6.

KNY ET AL. 1986

Kny, E.; Bader, T.; Hohenrainer, C.; Schmid, L.: Korrosionsresistente, hochverschleißfeste Hartmetalle. *Werkstoffe und Korrosion* 37 (1986) 5, S. 230-235.

KÖHLER ET AL. 2009

Köhler, P.; Witt, G.; Weckend, F.: Wissensbasiertes Unterstützungssystem für Rapid Prototyping gerechte 3D-CAM-Prozesse. <<http://www.uni-due.de/imperia/md/content/cad/abschlussbericht-rp-aif-nr-15351-bg.pdf>> - 09.05.2011.

KOLYMBAS 1988

Kolymbas, D.: Eine konstitutive Theorie für Böden und andere körnige Stoffe. Diss. Universität Fridericiana Karlsruhe. Karlsruhe (1988).

KOLYMBAS 1991

Kolymbas, D.: An outline of hypoplasticity. *Applied Mechanics* 61 (1991), S. 143-151.

KRETZLER 2002

Kretzler, K.: Eine neue Methode zur Bestimmung der Fließfähigkeit von Schüttgütern. Diss. Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Würzburg (2002).

KRISTOF & HENNICKE 2009

Kristof, K.; Hennicke, P.: Endbericht des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). <[http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess\\_Endbericht.pdf](http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_Endbericht.pdf)> - 09.05.2011.

KRUTH ET AL. 2004A

Kruth, J.-P.; Froyen, L.; Van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P.; Rombouts, M.; Lauwers, B.: Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 1-3, S. 616-622.

KRUTH ET AL. 2007

Kruth, J.-P.; Levy, G. N.; Klocke, F.; Childs, T. H.: Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. In: *The International Academy for Production Engineering (Hrsg.): CIRP Annals* 56 2007, S. 730-759.

KRUTH ET AL. 2003

Kruth, J.-P.; Wang, X.; Laoui, T.; Froyen, L.: Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation* 23 (2003) 4, S. 357-371.

KRUTH ET AL. 2001

Kruth, J.-P.; Wang, X.; Laoui, T.; Froyen, L.: Laser and Materials in Selective Laser Sintering. In: Geiger, M. (Hrsg.): *Laser assisted net shape engineering* 3. Bamberg: Meisenbach 2001, S. 3-24. ISBN: 3-87525-154-7.

KRUTH ET AL. 2004B

Kruth, J.-P.; Mercelis, P.; Froyen, L.; Rombouts, M.: Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): *Solid Freeform Fabrication Proceedings*. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher 2004, S. 44-59.

KRUTH ET AL. 2005

Kruth, J.-P.; Mercelis, P.; Van Vaerenbergh, J.; Froyen, L.; Rombouts, M.: Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 11 (2005) 1, S. 26-36.

KUMAR 1998

SCHUTZRECHT: US 006066285 Patent (2000-05-23). University of Florida. Pr.: 09/209,870 1998-12-11. Kumar, A. V.: Solid Freeform Fabrication using Powder Deposition.

KUMAR & J.-P. KRUTH 2008

Kumar, S.; J.-P. Kruth: Wear Performance of SLS/SLM Materials. *Advanced Engineering Materials* Vol. 10 (2008) 8, S. 750-753.

KUSCHEL 1998

Kuschel, S.: Fließverbesserung pulverförmiger Lebensmittel am Beispiel von Gewürzen. Diss. Technische Universität München. München (1998).

KÜSTERS ET AL. 2009

Küstern, Y.; Schäfer, M.; Müller, A.: Pulverbettbasiertes Strahlschmelzen - neue Forschungserkenntnisse. *RTEjournal - Forum für Rapid Technologien* 6 (2009) 6.

KWADE ET AL. 1994A

Kwade, A.; Schulze, D.; Schwedes, J.: Die direkte Messung des Horizontallastverhältnisses. *Beton- und Stahlbetonbau* 89 (1994) 3, S. 58-63.

KWADE ET AL. 1994B

Kwade, A.; Schulze, D.; Schwedes, J.: Die direkte Messung des Horizontallastverhältnisses. *Beton- und Stahlbetonbau* 89 (1994) 4, S. 117-119.

LANGSTON ET AL. 1995

Langston, P. A.; Tüzün, U.; Heyes, D. M.: Discrete element simulation of granular flow in 2D and 3D hoppers: dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions. *Chemical Engineering Science* 50 (1995) 6, S. 967-987.

LANGSTON ET AL. 1996

Langston, P. A.; Tüzün, U.; Heyes, D. M.: Distinct element simulation of interstitial air effects in axially symmetric granular flows in hoppers. *Chemical Engineering Science* 51 (1996) 6, S. 873-891.

LAOUI ET AL. 2000

Laoui, T.; Froyen, L.; Kruth, J.-P.: Effect of mechanical alloying on Selective Laser Sintering of WC-9Co. *Powder Metallurgy* 42 (2000) 3, S. 203-205.

LEE-DESAUTELS 2005

Lee-Desautels, R.: Theory of van der Waals Forces. *Educational Resources for Particle Technology* 5 (2005) 1, S. 1-8.

LEVY ET AL. 2003

Levy, G. N.; Schindel, R.; Kruth, J.-P.: Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. In: *The International Academy for Production Engineering (Hrsg.): CIRP Annals* 52 2003, S. 589-610.

LI ET AL. 2009

Li, Y.; Xu, Y.; Jiang, S.: DEM simulations and experiments of pebble flow with monosized spheres. Powder Technology 193 (2009) 3, S. 312-318.

LINDEMANN 2011

Lindemann, U.: Produktentwicklung und Konstruktion. Vorlesungsmanuskript. Lehrstuhl für Produktentwicklung. Technische Universität München. München (2011).

LINDEMANN ET AL. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F.: Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-54025-506-0. (VDI-Buch).

LIU & YANG 2001

SCHUTZRECHT: US 6780368B2 Patent (2004-08-24). Nanotec Instruments Inc. Pr.: 09/829,548 2001-04-10. Liu, J.; Yang, B. Z.: Layer manufacturing of a multi-material or multi-color 3-D object using electrostatic imaging and lamination.

LOHNER & WILKENING 1996

SCHUTZRECHT: DE 19606128A1 Patent (1997-8-21). EOS GmbH Electro Optical Systems GmbH. Pr.: 19606128.8 1996-02-20. Lohner, A.; Wilkening, C.: Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objektes.

LÓPEZ MARTÍNEZ 2008

López Martínez, D.: Überschallflammspritzen (HVOF) von metallurgischen und cermetischen Schichten für Zylinderlaufflächen. Diss. Universität Stuttgart. Aachen: Shaker 2008. ISBN: 978-3-83227-563-1. (Forschungsberichte des IFKB).

LUGSCHEIDER 2002

Lugscheider, E. (Hrsg.): Handbuch der thermischen Spritztechnik. Düsseldorf: DVS-Verlag 2002. ISBN: 3-87155-186-4.

LUTZMANN 2010

Lutzmann, S.: Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Diss. Technische Universität München. München (2010).

MAEDA & CHILDS 2004

Maeda, K.; Childs, T. H.: Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings. Journal of Materials Processing Technology 149 (2004) 1-3, S. 609-615.

MARKEFKA & STECKEL 2005

Markefka, P.; Steckel, H.: Powder flowability analysis as predictor for delivered mass uniformity form dry powder inhalers. Pharm. Ind. 7 (2005), S. 823-829.

### MATTHÄUS & STURGEON 2006

Matthäus, G.; Sturgeon, A.: Einsatz des HVOF Verfahrens für Innenbeschichtungen bei Zylindern und Hard- und Software für die Innenbeschichtung komplexer Bauteile. In: Böhme, D. et al. (Hrsg.): 7. Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF). Unterschleißheim: Gemeinschaft Thermisches Spritzen 2006, S. 199-205.

### MAYER 2009

Mayer, R.: Konstruktion, Simulation und Amortisation konturnah temperierter Werkzeuge im Formenbau. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Ressourceneffizienz durch additive Fertigung im Werkzeug- und Formenbau. München: Utz 2009, S. 7-1 bis 7-22.

### MEDICOAT 2001

Medicoat: Betriebsanleitung Pulverförderer. Mängenwil, Schweiz: 2001.

### MEINDL 2005

Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung additiver Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. Diss. Technische Universität München (2005). München: Utz 2005. ISBN: 978-3-83160-465-4. (Forschungsberichte iw b 187).

### MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Diss. RWTH Aachen (1999). Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-82656-571-1. (Berichte aus der Lasertechnik).

### MEINERS & WISSENBACH 2007

SCHUTZRECHT: DE 102007029052A1 Patentanmeldung (2009-01-02). Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Pr.: 102007029052.9 2007-06-21. Meiners, W.; Wissenbach, K.: Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines Bauteils basierend auf dreidimensionalen Daten des Bauteils.

### MERCELIS & KRUTH 2006

Mercelis, P.; Kruth, J.-P.: Residual stresses in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting. Rapid Prototyping Journal 12 (2006) 5, S. 254-265.

### MERKEL & THOMAS 2003

Merkel, M.; Thomas, K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe (mit 143 Tabellen). 6., verbesserte Aufl. München: Hanser 2003. ISBN: 978-3-44622-084-3.

### MEYER 2007

Meyer, R.: Werkzeugloses Fertigen als Konstruktionstrick. Industrieanzeiger (2007) 20, S. 22-25.

### MOLERUS 1985

Molerus, O.: Schüttgutmechanik. Berlin: Springer 1985. ISBN: 3-54015-428-0.

### MÜLLER 1961

Müller, A.: Zur Beschreibung des Fließverhaltens konzentrierter technischer Suspensionen unter Prozessbedingungen. Diss. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg (1961).



N.N. 2005

N.N.: 2709 Vakumelt. <[http://thyssen.ch/uploadfiles/File/Produkte\\_Dienstleistungen/ws2709.pdf](http://thyssen.ch/uploadfiles/File/Produkte_Dienstleistungen/ws2709.pdf)> - 17.02.2011.

NIEBLING 2005

Niebling, F.: Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2005). Bamberg: Meisenbach 2005. ISBN: 3-87525-219-5. (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie 156).

NOWOTNY ET AL. 1993

Nowotny, S.; Techel, A.; Reitzenstein, W.: Herstellung hartmetallähnlicher Verschleißschutzschichten durch Laserauftragsschweißen von Hartstoff-Hartlegierungs-Pulvergemischen. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser in der Technik 1993, S. 461-464. ISBN: 3-54057-444-1.

OTT 2011

Schutzrecht: DE WO2011/085946A1 Patentanmeldung (2011-07-21). Technische Universität München Pr.: 102010004869.6 2011-01-07. Ott, M.: Pulverauftragseinrichtung sowie Fertigungseinrichtung.

OVER 2003

Over, C.: Additive Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit "Selective Laser Melting". Diss. RWTH Aachen (2003). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-83222-245-6. (Berichte aus der Lasertechnik).

PARTES 2008

Partes, K.: Hochgeschwindigkeitsbeschichten mit dem Laserstrahl. Diss. Universität Bremen (2008). Bremen: BIAS 2008. ISBN: 978-3-93376-226-9. (Strahltechnik 34).

PETERSEN & EMMELMANN 2005

Petersen, M.; Emmelmann, C.: Theoretical and Experimental Studies of Direct Laser Generating of Ceramic Metal Composites. In: Beyer, E. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2005. Stuttgart: AT-Fachverlag 2005, S. 251-255. ISBN: 3-00016-402-2.

PIEPER & WENZEL 1994

Pieper, K.; Wenzel, F.: Druckverhältnisse in Silozellen. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag 1994. ISBN: 3-43300-373-4.

PILLER 2006

Piller, F. T.: Mass customization. 4., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verlag 2006. ISBN: 3-83500-355-0.

PLEGGE 1994

Plegge, T.: Beitrag zur Herstellung von Verschleißschutzschichten durch gezielte Hartstoffeinbringung in eine metallische Matrix. Diss. Technische Universität Clausthal. Clausthal (1994).

POHLE 1999

Pohle, C.: Schweißen von Werkstoffkombinationen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999. ISBN: 3-87155-187-2. (Fachbuchreihe Schweißtechnik 140).

POLIFKE & KOPITZ 2005

Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung. München: Pearson Studium 2005. ISBN: 978-3-82737-104-1.

POPRAWA 2005

Poprawa, R.: Lasertechnik für die Fertigung. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3-54021-406-9.

RAMOS ET AL. 2002

Ramos, J. A.; Murphy, J.; Lappo, K.: Single-layer Deposits of Nickel Base Superalloy by means of Selective Laser Melting. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Proceedings. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher 2002, S. 211-223.

REHME 2010

Rehme, O.: Cellular Design for Laser Freeform Fabrication. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg (2009). Göttingen: Cuvillier 2010. ISBN: 978-3-86955-273-6. (Schriftreihe Lasertechnik 4).

REHME & EMMELMANN 2005

Rehme, O.; Emmelmann, C.: Reproducibility for Properties of Selective Laser Melting products. In: Beyer, E. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2005. Stuttgart: AT-Fachverlag 2005, S. 227-232. ISBN: 3-00016-402-2.

REHME ET AL. 2004

Rehme, O.; Emmelmann, C.; Lorenz, W.; Tholke, W.: Laserinnovationen für den Werkzeug- und Formenbau. <[www.tu-hamburg.de/ilas/team/rehme/Publikation\\_0410\\_Laserinnovationen\\_fuer\\_den\\_Werkzeug\\_und\\_Formenbau.pdf](http://www.tu-hamburg.de/ilas/team/rehme/Publikation_0410_Laserinnovationen_fuer_den_Werkzeug_und_Formenbau.pdf)> - 02.08.2008.

REICHWALD 2005

Reichwald, R.: Innovations- und Produktionsmanagement. Wiesbaden: Gabler 2005. ISBN: 3-83490-106-7.

ROCK & GILMAN 1995

SCHUTZRECHT: US 005555481 Patent (1996-09-10). Rensselaer Polytechnic Institute. Pr.: 509,730 1995-08-01. Rock, S. J.; Gilman, C. R.: Method of Producing Solid Parts Using Two Distinct Classes of Materials.

ROMBACH & NEUMANN 2003

Rombach, G. A.; Neumann, F.: Schüttguteinwirkung auf Silozellen. Hamburg: 20.-21.03.2003.

ROMBOUTS 2006

Rombouts, M.: Selective laser sintering/melting of iron-based powders. Diss. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, Belgien (2006).

RUMPF 1990

Rumpf, H.: Particle technology. London, England: Chapman and Hall 1990. ISBN: 0-41235-230-3. (Powder technology series).

SACHVERSTÄNDIGENRAT 2010

Sachverständigenrat: Chancen für einen stabilen Aufschwung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2010. ISBN: 978-3-82460-911-6.

SANDVIK 2010

Sandvik: Das ist Hartmetall.

<[http://www.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/7a5364adb7735b05412568c70034ea1b/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/\\$FILE/ATTGAHWR/9100%20ger.pdf](http://www.sandvik.com/sandvik/0130/HI/SE03411.nsf/7a5364adb7735b05412568c70034ea1b/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/$FILE/ATTGAHWR/9100%20ger.pdf)> - 26.02.2010.

SCHATT ET AL. 2007

Schatt, W.; Kieback, B.; Wieters, K.-P.: Pulvermetallurgie. 2., bearbeitet und erweitert Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-54023-652-8.

SCHEDLER 1988

Schedler, W.: Hartmetall für den Praktiker (Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe). Düsseldorf: VDI-Verlag 1988. ISBN: 3-18400-803-7.

SCHMIDLIN 1998

SCHUTZRECHT: US 6416171B1 Patent (2002-07-09). Technology Innovations LLC. Pr.: 09/188,458 1998-11-09. Schmidlin, F. W.: Xerojet dry powder printing process.

SCHMIDT ET AL. 2010

Schmidt, M., Kolleck, R., Grimm, A.; Veit, R.; Bartkowiaka, K.: Direct laser deposition of Cu alloy on forming tool surfaces - Process window and mechanical properties. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 (2010) 1, S. 211-214.

SCHULZ 1987

Schulz, W.-D.: Thermisches Spritzen von Metallen, Metalloxiden und Hartstoffen. Dresden: Druckerei der Domowina Bautzen 1987. (Aus der Zentralstelle für Korrosionsschutz 53/54).

SCHULZE 1991

Schulze, D.: Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragungsorgan. Diss. Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig (1991).

SCHULZE 1995

Schulze, D.: Zur Fließfähigkeit von Schüttgütern - Definition und Messverfahren. Chemie Ingenieur Technik 67 (1995) 1, S. 60-68.

SCHULZE 2009

Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter. 2., bearbeitet Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-54088-448-4. (VDI-Buch).

### SCHULZE 2004

Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens (Eisenwerkstoffe, nichteisenmetallische Werkstoffe). 3., neu bearbeitet und erweitert Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, NY: Springer 2004. ISBN: 3-54020-649-3.

### SCHURICHT 2004

Schuricht, T.: Analysen des Fließverhaltens von Schüttgut in einem Kernflußsilo mit Einbautrichter. Diss. Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig (2004).

### SCHWEDES 1968

Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern (Bericht) Universität Karlsruhe. Karlsruhe (1968).

### SCHWEDES 2003

Schwedes, J.: Review on testers for measuring flow properties of bulk solids. Granular Matter 5 (2003) 1, S. 1-43.

### SCHWETZKE ET AL. 2006

Schwetzke, R.; Krömmer, W.; Heinrich, P.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum HVOF-Spritzen. In: Böhme, D. et al. (Hrsg.): 7. Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF). Unterschleißheim: Gemeinschaft Thermisches Spritzen 2006, S. 63-70.

### SEEFRIED 2005

Seefried, M.: Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern. Diss. Technische Universität München (2005). München: Utz 2005. ISBN: 978-3-83160-503-3. (Forschungsberichte iw 194).

### SEHRT 2010

Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der additiven Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen (2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-83229-229-4.

### SIGL 1986

Sigl, L.: Das Zähigkeitsverhalten von WC-Co-Legierungen. Diss. Universität Stuttgart (1986). Düsseldorf: VDI-Verlag 1986. ISBN: 3-18140-405-5. (Fortschritt-Berichte VDI 104).

### SIGL 2008

Sigl, M.: Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns. Diss. Technische Universität München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 3-83160-841-5.

### SOMMER ET AL. 2010

Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 978-3-83510-126-5.

### STADLER 1986

Stadler, R.: Stationäres, schnelles Fließen von dicht gepackten trockenen und feuchten Schüttgütern. Diss. Universität Fridericiana Karlsruhe. Karlsruhe (1986).

STATISTISCHES BUNDESAMT 2010

Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2010. Paderborn: Bonifatius 2010. ISBN: 978-3-82460-897-3.

TANG & LI 2005

Tang, H. H.; Li, W. C.: Cerment Laser Sintering. In: Beyer, E. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2005. Stuttgart: AT-Fachverlag 2005, S. 239-243. ISBN: 3-00016-402-2.

THEILER 2003

Theiler, C.: Aufbau gradiertes Nickelbasis-Chromkarbid-Verbundwerkstoffe durch Laserstrahl-Pulverbeschichten. Diss. Universität Bremen (2003). Bremen: BIAS 2003. ISBN: 3-93376-211-1. (Strahltechnik 21).

THEILER ET AL. 2001

Theiler, C.; Seefeld, T.; Sepold, G.: Deposition of Graded Metal Matrix composites by Laser Beam Cladding. In: Geiger, M. (Hrsg.): Laser assisted net shape engineering 3. Bamberg: Meisenbach 2001, S. 421-430. ISBN: 3-87525-154-7.

TOLOCHKO ET AL. 2000

Tolochko, N.; Laoui, T.; Khlopkov, Y. V.; Mozzharov, S.; Titov V. I.; Ignatiev M. B.: Absorptance of powder materials suitable for laser sintering. Rapid Prototyping Journal 6 (2000) 3, S. 155-160.

TOMAS 1990

Tomas, J.: Modellierung des Fließverhaltens von Schüttgütern auf der Grundlage der Wechselwirkungskräfte zwischen den Partikeln und Anwendung bei der Auslegung von Bunkern. Diss. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg (1990).

TOMAS 2009

Tomas, J.: Produkteigenschaften ultrafeiner Partikel. Stuttgart: Hirzel 2009. ISBN: 978-3-77761-681-0. (Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Technikwissenschaftliche Klasse 3).

TYKHONIUK ET AL. 2003

Tykhoniuk, R.; Luding, S.; Tomas, J.: Simulation der Scherdynamik kohäsiver Pulver. <[http://www.ovgu.de/ivt/mvt/deutsch/Vortraege/Tykhoniuk\\_Baden\\_Baden.pdf](http://www.ovgu.de/ivt/mvt/deutsch/Vortraege/Tykhoniuk_Baden_Baden.pdf)> - 06.10.2009.

UCKELMANN 2007

Uckelmann, I.: Additive Serienfertigung von individuellen Produkten aus CoCr mit dem Selektiven Laser-Schmelzen. Diss. RWTH Aachen (2007). Aachen: Shaker 2007. ISBN: 3-83224-989-3. (Berichte aus der Lasertechnik).

UHLMANN 2003

Uhlmann, E.: Wandel der Fabrik durch Produktindividualisierung. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003, S. 117-127. ISBN: 3-54000-594-3.

## Literaturverzeichnis

---

VAN DER EIJK ET AL. 2004

van der Eijk, C.; Mugaas, T.; Karlsen, R.; Åsebø, O.; Kolnes, O.; Skjevdal, R.: Metal Printing Process; Development of a New Rapid Manufacturing Process for Metal Parts. World PM2004 (Powder Metallurgy). Wien, Österreich: 17.-21.10.2004.

VANDENBROUCKE 2008

Vandenbroucke, B.: Selective Laser Melting of Biocompatible Metals for Rapid Manufacturing of Medical Parts. Diss. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, Belgien (2008).

VDI 3258, BLATT 1 1962

VDI 3258: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen. Berlin: Beuth 1962.

VDI 3258, BLATT 2 1964

VDI 3258: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen. Berlin: Beuth 1964.

VDI 3404 2009

VDI 3404: Additive Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth 2009.

VERLINDEN 2000

Verlinden, A.: Experimental assessment of shear testers for measuring flow properties of bulk solids. Diss. University of Bradford. Bradford, England (2000).

WALKOWIAK 1997

Walkowiak, G.: Verschleißverhalten von Laserbeschichtungen aus WC-verstärkten Ni-Hartlegierungen und TiC-verstärkten Stählen. Diss. RWTH Aachen (1997). Aachen: Mainz 1997. ISBN: 3-89653-227-8. (Werkstoffwissenschaftliche Schriftenreihe 22).

WALTER 1976

Walter, A.: Der Einfluss unterschiedlicher Karbidpulver auf Gefüge und Eigenschaften von Wolframkarbid-Kobalt-Legierungen. Diss. Universität Stuttgart. Stuttgart (1976).

WANG ET AL. 2002

Wang, X. C.; Laoui, T.; Bonse, J.; Kruth, J.-P.; Lauwers, B.; Froyen, L.: Direct Selective Laser Sintering of Hard Metal Powders: Experimental Study and Simulation. Advanced Manufacturing Technology 19 (2002) 5, S. 351-357.

WEISHEIT & FUCHS 2006

Weisheit, A.; Fuchs, E.: Multifunktionale Gradientenwerkstoffe für den Werkzeugbau. <<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb07/53766176X.pdf>> - 20.08.2010.

WEISSBACH 2001

Weissbach, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 14., verbesserte Aufl. Braunschweig: Vieweg 2001. ISBN: 3-52801-119-X.

### WILKES & WISSENBACH 2007

Wilkes, J.; Wissenbach, K.: Rapid manufacturing of ceramic components by selective laser melting. In: Vollertsen, F. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2007. Stuttgart: AT-Fachverlag 2007, S. 207-211. ISBN: 978-3-00021-449-3.

### WIRTH 2004

Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. 1. Aufl. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-54020-423-7.

### WITT 2006

Witt, G.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. 1. Aufl. Leipzig: Hanser 2006. ISBN: 3-44622-540-4.

### WITTMAYER 2003

Wittmaier, A.: Fließverhalten hochdisperser Pulver bei sehr kleinen Spannungen. Diss. Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig (2003).

### WOHLERS 2007

Wohlers, T.: Wohlers report 2007 (Annual worldwide progress report) Wohlers Associates. Fort Collins, USA: Wohlers Associates 2007. ISBN: 0-97544-293-7.

### WOHLERS 2009

Wohlers, T.: Wohlers report 2009 (Annual worldwide progress report) Wohlers Associates. Fort Collins, USA: Wohlers Associates 2009. ISBN: 0-97544-295-3.

### YADROITSEV 2009

Yadroitsev, I.: Selective Laser Melting. Diss. National Academy of Sciences of Belarus (2009). Saarbrücken: Lambert Academic Publishing 2009. ISBN: 978-3-83831-794-6.

### YANG & EVANS 2010

Yang, S.; Evans, J. R.: A dry powder jet printer for dispersing and combinatorial research. <<http://www.materials.qmul.ac.uk/research/researchdetail.php?rid=98>> - 28.02.2010.

### YASA & KRUTH 2009

Yasa, E.; Kruth, J.-P.: Microstructure Evolution of Selective laser Molten 316L stainless Steel parts with Laser re-melting. In: Ostendorf, A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. München 2009, S. 181-188. ISBN: 978-3-00027-994-2.

### YEN ET AL. 2005

Yen, H. C.; Tang, H. H.; Chen, T. C.: Fabricating workpiece with 1700 dpi vertical resolution by ceramic laser sintering. In: Beyer, E. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2005. Stuttgart: AT-Fachverlag 2005, S. 245-249. ISBN: 3-00016-402-2.

ZÄH 2006

Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien (Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren). München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-44622-854-2.

ZÄH ET AL. 2009A

Zäh, M. F.; Götzfried, A.; Krol, T. A.; Ott, M.; Schilp, J.: Ressourceneffizienz durch additive Fertigung Werkzeug- und Formenbau. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Ressourceneffizienz durch additive Fertigung im Werkzeug- und Formenbau. München: Utz 2009, S. 1-1 - 1-17.

ZÄH ET AL. 2009B

Zäh, M. F.; Daub, R.; Mahrle, A.; Beyer, E.: Influence of CO<sub>2</sub> in Ar Process-Gas on the Heat-Conduction Mode Laser Beam Welding Process with Nd:YAG and Diode Lasers. In: Ostendorf, A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. München 2009, S. 45-51. ISBN: 978-3-00027-994-2.

ZÄH ET AL. 2010A

Zäh, M. F.; Kellner, I. N.; Moegele, F.: Multi-Material 3D Inkjet Printing - Conductive Paths in Polymer Parts. In: Dimitrov, D. et al. (Hrsg.): Proceedings International Conference on Competitive Manufacturing. Stellenbosch 2010, S. 51-56.

ZÄH ET AL. 2010B

Zäh, M. F.; Lindemann, U.; Lüth, T.: Qualitätsmanagement. Vorlesungsmanuskript. Technische Universität München. München (2010).

ZÄH ET AL. 2009C

Zäh, M. F.; Daub, R.; Beyer, E.; Mahrle, A.: Control of the Flow Regime in Laser-induced Melt Pools. Part I: Experimental Investigations on the Heat-conduction Mode Laser Beam Welding Process. M4PL22. Igls, Österreich: 21.-23.01.2009.

ZHANG 2004

Zhang, D.: Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) für Aluminiumwerkstoffe. Diss. RWTH Aachen (2004). Aachen: Shaker 2004. ISBN: 3-83223-104-8. (Berichte aus der Lasertechnik).

ZHAO ET AL. 2001

Zhao, X.; Evans, J. R.; Edirisinghe, M. J.; Song, J. H.: Ceramic Freeforming Using an Advanced Multinozzle Ink-Jet Printer. Journal of Materials Synthesis and Processing 9 (2001) 6, S. 319-327.



## 10 Anhang

### 10.1 Algorithmus für den selektiven Pulverauftrag

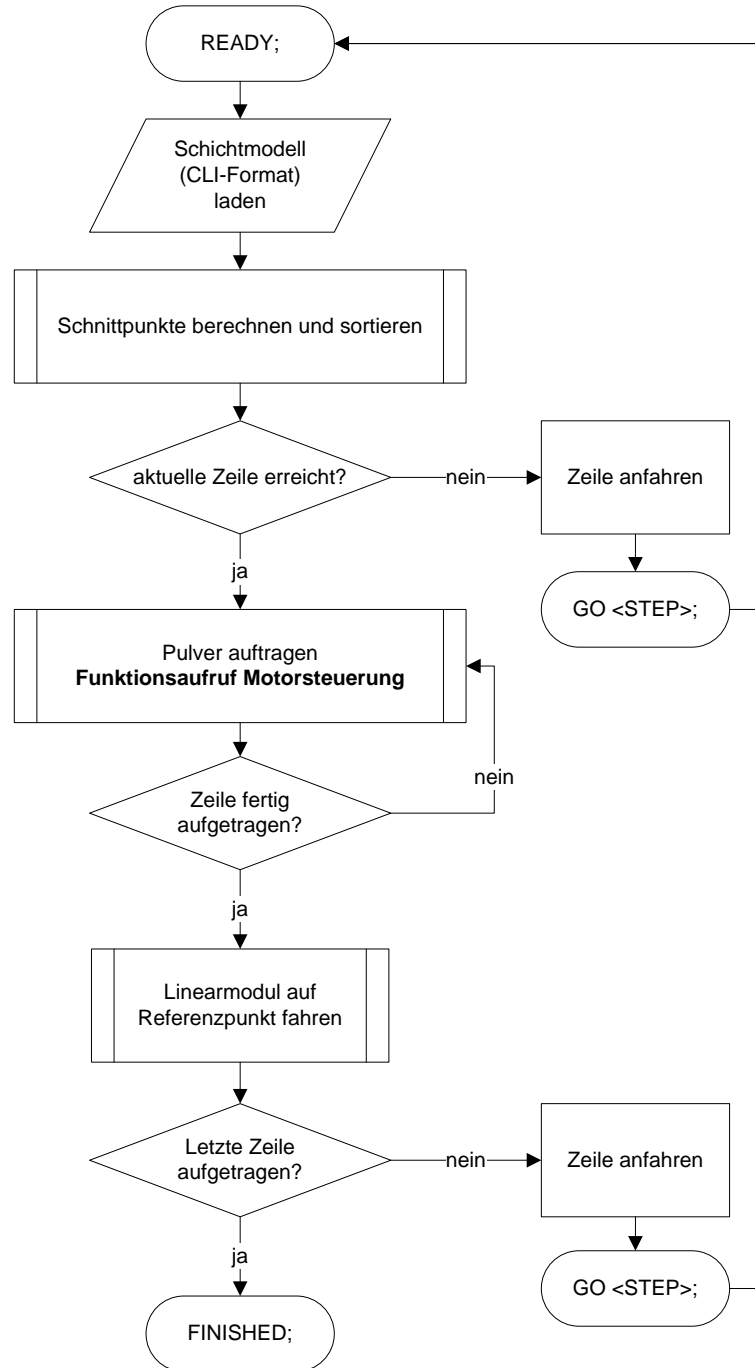


Abbildung 10-1: Ablaufdiagramm des selektiven Pulverauftrags

## 10.2 Flussdiagramme der kohäsionslosen Pulverfraktionen

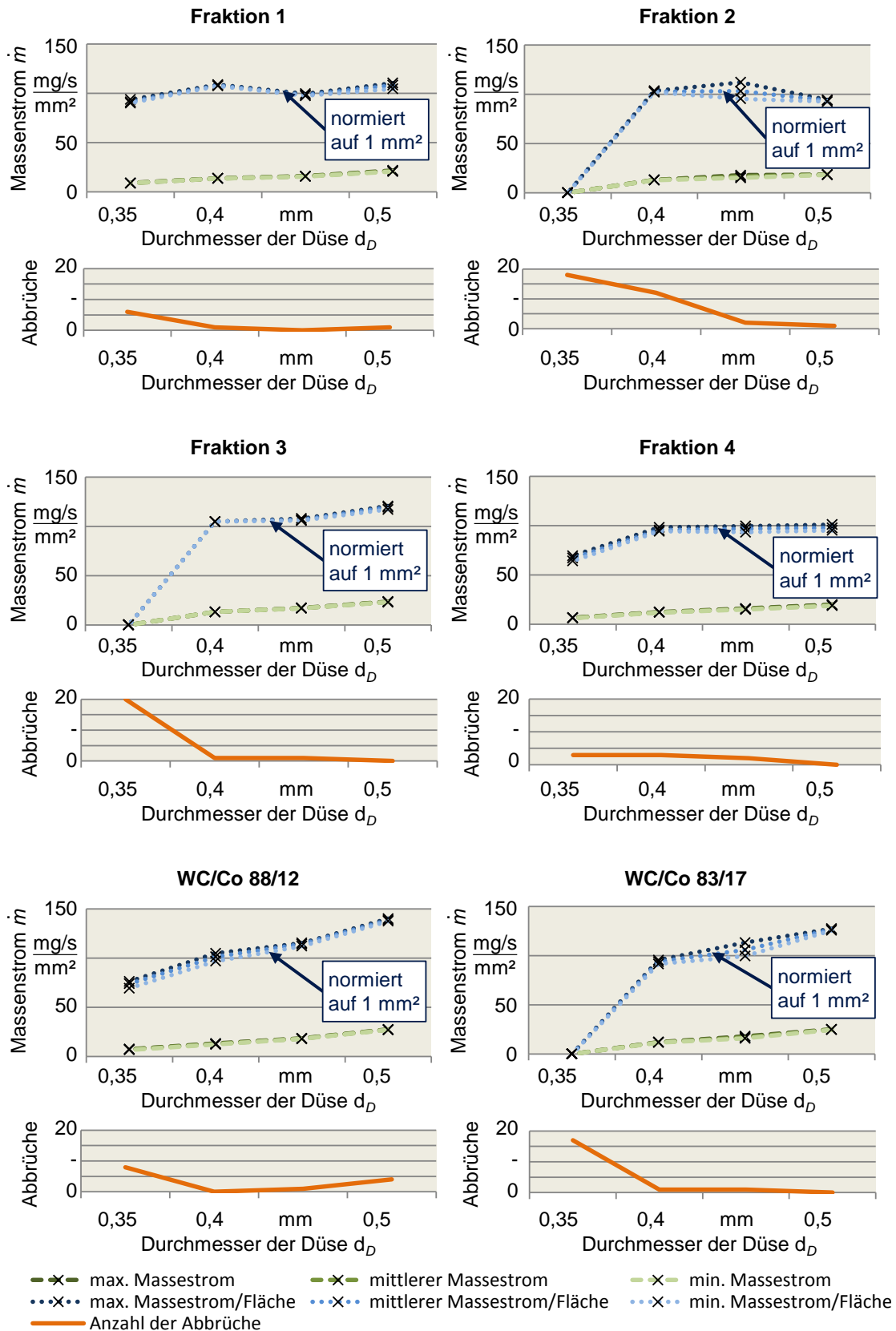


Abbildung 10-2: Verläufe des ermittelten Pulverflusses für Fraktion 1 bis 4 sowie für WC/Co 88/12 und WC/Co 83/17 (vgl. Abschnitt 5.2)

## 10.3 Bewertungsmatrizen

### 10.3.1 Bewertungsklasse *Kosten*

#### Bewertung der Kosten für die Stückzahl 1

monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 1		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	23,60 €
Materialkosten	$K_{MK}$	5,63 €

multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 1		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	24,47 €
Materialkosten	$K_{MK}$	5,62 €

additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 1		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	24,08 €
Materialkosten	$K_{MK}$	5,63 €

monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 2		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	20,39 €
Materialkosten	$K_{MK}$	3,26 €

multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 2		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	22,14 €
Materialkosten	$K_{MK}$	3,26 €

## Anhang

---

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	20,88 €
Materialkosten	$K_{MK}$	3,27 €

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	34,67 €
Materialkosten	$K_{MK}$	4,10 €

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	39,62 €
Materialkosten	$K_{MK}$	4,08 €

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	nicht fertigbar
Materialkosten	$K_{MK}$	4,10 €

### Bewertung der Kosten für die Stückzahl 10

monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 1		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	11,65 €
Materialkosten	$K_{MK}$	5,63 €

multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 1		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	12,24 €
Materialkosten	$K_{MK}$	5,62 €

additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 1		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	12,14 €
Materialkosten	$K_{MK}$	5,63 €

monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 2		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	7,58 €
Materialkosten	$K_{MK}$	3,26 €

multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 2		
Kriterium (je Bauteil)	Formelzeichen	Wert
Prozesskosten	$K_{FP}$	9,32 €
Materialkosten	$K_{MK}$	3,26 €

## Anhang

---

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	8,06 €
Materialkosten	$K_{MK}$	3,27 €

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	10,78 €
Materialkosten	$K_{MK}$	4,10 €

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	15,73 €
Materialkosten	$K_{MK}$	4,08 €

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Prozesskosten	$K_{FP}$	nicht fertigbar
Materialkosten	$K_{MK}$	4,10 €

### 10.3.2 Bewertungsklasse Zeit

#### Bewertung der Zeit für die Stückzahl 1

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 1</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	30 min
Fertigungszeit	$t_F$	81 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	60 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	60 min

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 1</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	45 min
Fertigungszeit	$t_F$	< 84 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	90 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	60 min

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 1</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	30 + 45 min
Fertigungszeit	$t_F$	81 + < 1 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	60 + 90 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	60 + 90 min

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	30 min
Fertigungszeit	$t_F$	70 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	60 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	60 min

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	45 min
Fertigungszeit	$t_F$	< 76 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	120 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	60 min

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	30 + 45 min
Fertigungszeit	$t_F$	70 + < 1 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	60 + 120 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	60 + 90 min

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	30 min
Fertigungszeit	$t_F$	119 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	60 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	60 min

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	45 min
Fertigungszeit	$t_F$	< 136 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	120 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	60 min

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	30 + 45 min
Fertigungszeit	$t_F$	nicht fertigbar
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	60 + 120 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	60 + 90 min



### Bewertung der Zeit für die Stückzahl 10

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 1</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	3 min
Fertigungszeit	$t_F$	40 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	6 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	6 min

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 1</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	5 min
Fertigungszeit	$t_F$	< 42 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	9 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	6 min

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 1</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	3 + 5 min
Fertigungszeit	$t_F$	40 + < 1 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	6 + 9 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	6 + 9 min

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	3 min
Fertigungszeit	$t_F$	26 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	6 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	6 min

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	5 min
Fertigungszeit	$t_F$	< 32 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	12 min
Dauer bei Produktvariation	$t_p$	6 min

## Anhang

---

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 2</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	3 + 5 min
Fertigungszeit	$t_F$	26 + < 1 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	6 + 12 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	6 + 9 min

<b>monomaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	3 min
Fertigungszeit	$t_F$	37 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	6 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	6 min

<b>multimaterielle additive Fertigung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	5 min
Fertigungszeit	$t_F$	< 54 min
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	12 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	6 min

<b>additiv gefertigter Grundkörper + HVOF-Beschichtung für Bauteil 3</b>		
<b>Kriterium (je Bauteil)</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Wert</b>
Rüstzeit	$t_V$	3 + 5 min
Fertigungszeit	$t_F$	nicht beschichtbar
Bauteilaufbereitungszeit	$t_N$	6 + 12 min
Dauer bei Produktvariation	$t_P$	6 + 9 min

## 10.4 Maschinenstundensatz

Kostenart	Formel/ Formelzeichen	Einheit	Gen. Ferti- gung	therm. Spritzen (HVOF)
Wiederbeschaffungswert	$W_{WB}$	€	351.540	370.000
Nutzungsdauer	$N_D$	a	8	8
Arbeitszeit pro Jahr	$E_Z$	h/a	4.000	4.000
Verfügbarkeit	$V_A$	%	90	90
<b>Kalkulat. Abschreibung</b>	<b><math>K_{AS}=W_{WB}/(N_D E_Z V_A)</math></b>	<b>€/h</b>	<b>12,21</b>	<b>0,13</b>
Zinssatz	$Z_S$	%	5,12	5,12
<b>Kalkulat. Zinskosten</b>	<b><math>K_Z=W_{WB} Z_S/(2 E_Z V_A)</math></b>	<b>€/h</b>	<b>2,50</b>	<b>2,63</b>
Betriebskosten pro Fläche	$B_F$	€/m <sup>2</sup>	200	200
Flächenbedarf der Anlage	$F_A$	m <sup>2</sup>	12	16
<b>Raumkosten</b>	<b><math>K_R=F_A B_F/E_Z</math></b>	<b>€/h</b>	<b>0,60</b>	<b>0,80</b>
Nennleistung	$P_N$	kW	5	10
Strompreis	$K_{SK}$	€/(kWh)	0,19	0,19
Nutzungsfaktor	$N_F$	%	70	70
<b>Energiekosten</b>	<b><math>K_E=P_N K_{SK} N_F</math></b>	<b>€/h</b>	<b>0,67</b>	<b>1,33</b>
Instandhaltungskostensatz	$I_{KS}$	%	5	5
<b>Instandhaltungskosten</b>	<b><math>K_I=W_{WB} I_{KS}/(N_D E_Z V_A)</math></b>	<b>€/h</b>	<b>0,61</b>	<b>0,64</b>
Schutzgaspreis (Stickst., Propan, Sauerstoff, Druck- luft)	$K_G$	€/m <sup>3</sup>	0,3	0,56
Durchschnittlicher Gasver- brauch	$V_G$	m <sup>3</sup> /h	3	41,40
<b>Schutzgaskosten</b>	<b><math>K_{SG}=K_G V_G</math></b>	<b>€/h</b>	<b>0,90</b>	<b>23,32</b>
<b>Maschinenstundensatz (Vor- und Nachbereitung)</b>	<b><math>K_{MH}=K_{AS}+K_Z+K_R+K_E+K_I</math></b>	<b>€/h</b>	<b>16,58</b>	<b>5,53</b>
<b>Maschinenstundensatz (Fertigungsbetrieb)</b>	<b><math>K_{MH}=K_{AS}+K_Z+K_R+K_E+K_I+K_{SG}</math></b>	<b>€/h</b>	<b>17,48</b>	<b>28,85</b>

## 10.5 Berechnung der bauteilbezogenen Materialkosten

Ebene	Pulverkosten €/kg	abs. Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Auftrags- wirkungs- grad [-]	Material- kosten [€]
<b>Additiver Grundkörper</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	4000	100,0 %	5,63
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	0	100,0 %	0,00
<b>SUMME</b>		<b>4000</b>		<b>5,63</b>
<b>Thermisches Spritzen (HVOF)</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	0	100,0 %	0,00
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	20	64,0 %	0,03
<b>SUMME</b>		<b>20</b>		<b>0,03</b>
<b>Multimaterial</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	3980	100,0 %	5,60
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	20	100,0 %	0,02
<b>SUMME</b>		<b>4000</b>		<b>5,62</b>
<b>Additiver Grundkörper + thermisches Spritzen (HVOF)</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	3980	100,0 %	5,60
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	20	64,0 %	0,03
<b>SUMME</b>		<b>4000</b>		<b>5,63</b>

Zylindersegment	Pulverkosten €/kg	abs. Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Auftragswirkungsgrad [-]	Kosten je Masse [€/kg]
<b>Additiver Grundkörper</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	2320,08	100,0 %	3,26
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	0,00	100,0 %	0,00
<b>SUMME</b>		<b>2320,08</b>		<b>3,26</b>
<b>Thermisches Spritzen (HVOF)</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	0,00	100,0 %	0,00
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	20,80	64,0 %	0,03
<b>SUMME</b>		<b>20,80</b>		<b>0,03</b>
<b>Multimaterial</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	2300,03	100,0 %	3,24
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	20,80	100,0 %	0,02
<b>SUMME</b>		<b>2320,83</b>		<b>3,26</b>
<b>Additiver Grundkörper + thermisches Spritzen (HVOF)</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	2300,03	100,0 %	3,24
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	20,80	64,0 %	0,03
<b>SUMME</b>		<b>2320,83</b>		<b>3,27</b>

Bohrung	Pulverkosten €/kg	abs. Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Auftragswirkungsgrad [-]	Kosten je Masse [€/kg]
<b>Additiver Grundkörper</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	2910,76	100,0 %	4,10
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	0,00	100,0 %	0,00
<b>SUMME</b>		<b>2910,762</b>		<b>4,10</b>
<b>Thermisches Spritzen (HVOF)</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	0,00	100,0 %	0,00
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	36,00	64,0 %	0,06
<b>SUMME</b>		<b>36</b>		<b>0,06</b>
<b>Multimaterial</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	2874,76	100,0 %	4,04
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	36,00	100,0 %	0,04
<b>SUMME</b>		<b>2910,762</b>		<b>4,08</b>
<b>Additiver Grundkörper + thermisches Spritzen (HVOF)</b>				
Grundkörper 1.2709	175,00	2874,76	100,0 %	4,04
Beschichtung WC/Co 83/17	83,63	36,00	64,0 %	0,06
<b>SUMME</b>		<b>2910,762</b>		<b>4,10</b>

## 10.6 Berechnung der Gaskosten

	Gas- kosten €/m <sup>3</sup>	absoluter Gasverbrauch [l/min]	Kosten je Volumen [€/m <sup>3</sup> ]
Propan	4,22	70	0,43
Sauerstoff	0,22	260	0,08
Druckluft	0,10	360	0,05
<b>SUMME</b>	<b>4,54</b>	<b>690</b>	<b>0,56</b>

## 10.7 Prozessdaten der additiven Fertigung und des Hochgeschwindigkeits-Flammspritzens

Prozessdaten für die additive Fertigung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Schichthöhe	$h_p$	0,05	mm
Scan-Geschwindigkeit	$v_L$	600	mm/s
Fokusbereich des Laserstrahls	$d_L$	0,15	mm
Hatch-Abstand	$h_L$	0,105	mm
Pulverspurbreite	$b_p$	1,4	mm
Abstand der Pulverauftragungen	$a_p$	0,2	mm
Zeit je Pulverauftragung	$\Delta t_p$	1	s

Prozessdaten HVOF	Formelzeichen	Wert	Einheit
Pulverfördertrate	$\dot{m}$	70	g/min
Relativgeschwindigkeit der Düse zur Platte	$v_D$	1,3	m/s

## 11 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) in den Jahren 2009 bis 2011 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die folgenden studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Multi-materialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende(r)	Studienarbeit
Feistle, M.	Prozessentwicklung mit selektivem Pulverauftrag zur Multi-materialverarbeitung (Semesterarbeit, Technische Universität München), abgegeben im November 2010, eingeflossen in Abschnitt 5.3 und Abschnitt 5.4.
Gschwilm, T.	Bewertung der Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Multi-materialverarbeitung mittels laserstrahl- und pulverbettbasierter additiver Fertigung (Diplomarbeit, Rheinische Fachhochschule Köln), abgegeben im Mai 2011, eingeflossen in Abschnitt 6.1.1, Abschnitt 6.1.2, Abschnitt 6.1.3 und Abschnitt 6.2.4.1.
Houmpe, B.	Entwicklung einer Methode zur Bewertung tribologisch beanspruchter, komplexer Bauteile (Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes), abgegeben im September 2011, eingeflossen in Abschnitt 6.2.5 und Abschnitt 6.2.7.2.
Huber, J.	Ganzheitliche Bewertungsmethodik bei schichtweise erzeugten Multimaterialstrukturen (Semesterarbeit, Technische Universität München), abgegeben im Mai 2011, eingeflossen in Abschnitt 6.2.4.3, Abschnitt 6.2.7.1 und Abschnitt 6.3.
Köhler, A.	Verarbeitung von Hartstoffpulvern mittels laserbasierter, generativer Fertigung (Diplomarbeit, Hochschule Augsburg), abgegeben im März 2010, eingeflossen in Abschnitt 4.5
Kössler, C.	Konzeptentwicklung zur Multimaterialverarbeitung in der additiven Fertigung (Semesterarbeit, Technische Universität München), abgegeben im Juni 2011, eingeflossen in Abschnitt 4.3.
Sauer, P.	Konzeptentwicklung eines Materialauftrags (Semesterarbeit, Technische Universität München), abgegeben im Februar 2009, eingeflossen in Abschnitt 5.3 und Abschnitt 5.4.

## Studienarbeiten

---

Studierende(r)	Studienarbeit
Yang, L.	Anforderungen an Werkstoffe im additiven Fertigungsprozess zur Verschleißreduktion an hochbeanspruchten Bauteilen (Semesterarbeit, Technische Universität München), abgegeben im Februar 2010, eingeflossen in Abschnitt 6.1.
Yu, L.	Prozessbetrachtung und -optimierung beim pulverbettbasierten Strahlschmelzen (Semesterarbeit, Technische Universität München), abgegeben im April 2010, eingeflossen in Abschnitt 4.4.2.