

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

**Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen am
Beispiel von metallischen Verbindungen mit der
Kupferlegierung CW106C**

Christine Anstatt

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Die Dissertation wurde am 08.01.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 15.09.2020 angenommen.

Danksagung

Die Dissertation ist während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin zunächst in der Projektgruppe für Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen sowie dem hieraus entstanden Fraunhofer Institut für Gießerei, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV sowie dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München entstanden.

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die Möglichkeit und die Unterstützung während der Anfertigung meiner Arbeit bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt für die Übernahme des Koreferats sowie Frau Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich möchte mich auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die Zeit am Fraunhofer IGCV. Vor allem möchte ich mich bei aus meiner Abteilung für die lehrreiche und spannende Zeit bedanken, auf die ich gerne zurückblicke. Insbesondere möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing Fabian Riss sowie Dr.-Ing. Tobias Kamps für die gründliche Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Hinweise bedanken. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Studierenden vor allem Mario Schafnitzel, Fabian Wehner und Stefan Lidel bedanken, die mich bei der Ausfertigung dieser Arbeit unterstütz haben.

Mein größter Dank gilt schließlich meiner Familie, meinen Eltern Thomas und Elisabeth Anstatt, sowie meinem Bruder Philipp Anstatt. Vielen Dank für die bedingungslose Unterstützung und euren Rückhalt während der intensiven Zeit bei der Anfertigung meiner Doktorarbeit!

Fürth, im Oktober 2020

Christine Anstatt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		i
Abkürzungsverzeichnis		vii
Verzeichnis der Formelzeichen		viii
1 Einleitung		1
1.1 Motivation.....		1
1.2 Zielstellung		2
1.3 Aufbau der Arbeit		4
2 Stand der Forschung und der Technik		7
2.1 Additive Fertigung.....		7
2.2 Laserstrahlschmelzen.....		8
2.2.1 Prozesstechnische Grundlagen		8
2.2.2 Prozessqualifizierung.....		17
2.2.3 Auftragsmechanismen für das Laserstrahlschmelzen.....		19
2.3 Multimaterialverarbeitung		26
2.3.1 Klassifizierung von Multimaterialübergängen		26
2.3.2 Multimaterialverarbeitung mittels konventioneller Fertigungsverfahren.....		29
2.3.3 Multimaterialverarbeitung mittels metallbasierter additiver Fertigungsverfahren.....		30
2.3.4 Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen		33
2.4 Pulverseparierung		34
2.5 Fazit		34

3	Werkstoffe und angewendete Methoden	37
3.1	Werkstoffe	37
3.1.1	Werkzeugstahl 1.2709	38
3.1.2	Kupferlegierung CW106C	41
3.1.3	Aluminiumlegierung EN AC-43400	43
3.2	Analysemethoden	45
3.2.1	Analyse der relativen Dichte	45
3.2.2	Analyse der Werkstoffverteilung	47
3.2.3	Härteprüfung.....	48
3.3	Fazit	48
4	Auswahl eines Multimaterialauftragsmechanismus	51
4.1	Klassifizierung von Auftragskonzepten	52
4.2	Kriterien und Anforderungen zur Auswahl eines Auftragsmechanismus	53
4.2.1	Bauteilqualität.....	53
4.2.2	Technologische Anforderungen	55
4.2.3	Wirtschaftliche Aspekte	55
4.3	Auswahl eines Auftragskonzepts	56
4.4	Plausibilisierung anhand eines Beispiels.....	58
4.4.1	Randbedingungen	58
4.4.2	Lokaler Auftragsmechanismus ohne Absaugung.....	59
4.4.3	Lokaler Auftragsmechanismus mit Absaugung	59
4.4.4	Flächiger Auftragsmechanismus mit Absaugung.....	59
4.4.5	Beurteilung der Bauteilqualität	60
4.4.6	Beurteilung der technologischen Anforderungen.....	63

4.4.7	Beurteilung der wirtschaftlichen Aspekte	64
4.4.8	Auswahl eines Auftragskonzepts.....	69
4.5	Fazit	70
5	Die LBM-Multimaterial-Prozesskette	73
5.1	Multimaterial Pre-Prozess	73
5.2	Multimaterial In-Prozess	74
5.2.1	Anlagentechnik	74
5.2.2	LBM-Prozess	76
5.3	Multimaterial Post-Prozess.....	81
5.4	Fazit	83
6	Entwicklung der Multimaterialprozessparameter	85
6.1	Identifikation von Einflussgrößen	85
6.1.1	Validierung der Prozessparameter für den Monomaterialprozess.....	86
6.1.2	Makroskopische Untersuchungen.....	90
6.1.3	Mikroskopische Untersuchungen	96
6.1.4	Fazit	99
6.2	Identifikation von Steuergrößen	100
6.3	Analyse von Steuergrößen.....	103
6.3.1	Geometrische Anordnung.....	103
6.3.2	Belichtungsreihenfolge	105
6.3.3	Größe des Übergangsbereichs	111
6.3.4	Belichtungsmuster	114
6.4	Analyse der Störgrößen	116

6.5	Fazit	117
7	Qualifizierung von 3-D-Multimaterialkombinationen.....	119
7.1	Vorgehen zur Qualifizierung von Multimaterialkombinationen.....	119
7.2	Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400	123
7.2.1	Auswertung der Literatur	123
7.2.2	Monomaterialproben	125
7.2.3	2-D-Multimaterialproben	127
7.2.4	3-D-Multimaterialprobekörper	129
7.3	Fazit	130
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Multimaterialverarbeitung	133
8.1	Entwicklung des Kostenmodells	133
8.1.1	Kostenmodell.....	134
8.1.2	Diskussion des Modells.....	142
8.2	Szenarienanalyse zur Beurteilung Wirtschaftlichkeit	143
8.2.1	Referenzbauteil.....	143
8.2.2	Betrachtete Szenarien	144
8.2.3	Vergleich der Szenarien	146
8.3	Technologische Potenziale	150
8.4	Fazit	152
9	Schlussbetrachtung.....	153
9.1	Zusammenfassung	153
9.2	Resümee	155
9.3	Ausblick.....	156

10	Literaturverzeichnis	159
11	Anhang.....	I
11.1	Genutztes Equipment.....	I
11.1.1	Die Laserstrahlschmelzanlage	I
11.1.2	Lichtmikroskop	I
11.1.3	Mikroskop.....	I
11.1.4	Elektronenstrahlmikroskop.....	II
11.1.5	EDX-Analyse.....	II
11.1.6	Härteprüfmaschine.....	II
11.2	Experimentelle Bestimmung der Ablegegeschwindigkeit mittels Düse	III
11.3	Plausibilisierung der magnetbasierten Pulvertrennung	IV
11.4	Versuchspläne.....	VII
11.5	Auswahl eines Auftragskonzepts.....	XIX
11.6	Materialqualifizierung CW106C	XXI
11.7	Aufgetretene Fehlerbilder im Rahmen der Arbeit.....	XXI
11.8	Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	XXV
12	Studienarbeiten	XXXIII

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
2-D, 3-D	zweidimensional, dreidimensional
3-D-Drucken	dreidimensionales Drucken
3MF	3D Manufacturing Format
AMF	Additive Manufacturing Format
At.-%	Atomprozent
CDPM	Cool-Down Phase Model
Cu	Kupfer
CW106C	Kupfer-Chrom-Zirkonium
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN AC-43400	Aluminium-Silizium-Magnesium-Legierung
Fe	Eisen
ggf.	gegebenenfalls
HRC	Härte nach Rockwell
HV	Härte nach Vickers
LBM	Laserstrahlschmelzen (Laser Beam Melting)
TGM	Temperaturgradienten-Modell

Verzeichnis der Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_5	%	Bruchdehnung
A_{BF}	mm^2	Fläche der Bauplattform
d	mm	Größe des Übergangsbereiches
d_{ent}	mm	reale Spurbreite beim Entfernen des Pulverwerkstoffs
d_F	mm	Fokusbereich
d_o	mm	Düsenöffnungsdurchmesser
d_{sp}	mm	reale Spurbreite beim Auftragen des Pulverwerkstoffs
E_D	$\frac{J}{mm^2}$	Energiedichte
E_s	$\frac{J}{mm}$	Energiedichte zum Aufschmelzen einer Laser spur
E_F	$\frac{J}{mm^2}$	Flächenenergiedichte
E_V	$\frac{J}{mm^3}$	Volumenenergiedichte
<i>E-Modul</i>	<i>GPa</i>	<i>Elastizitätsmodul</i>
<i>Gew.</i>	<i>%</i>	<i>Gewichtsprozent</i>
h_h	mm	Schichthöhe
h_{auf}	mm	Spurhöhe beim Auftragen des Pulverwerkstoffs
h_B	mm	Bauteilhöhe
h_{ent}	mm	Spurhöhe beim Entfernen des Pulverwerkstoffs
h_s	mm	benötigte Schichthöhe

Verzeichnis der Formelzeichen

i	-	Zählvariable für Anzahl an Werkstoffen in einer Schicht
K	°	Temperaturangabe in Kelvin
k_{Ab}	-	Faktor zur Bestimmung des Einflusses der Anzahl der abgesaugten Schichten
$K_{Be,LBM}$	$\frac{€}{h}$	Maschinenstundensatz einer Laserstrahlschmelzanlage
k_{eP}	-	Faktor für Mehrbedarf an Ausgangsmaterial infolge der Absaugung
K_L	$\frac{€}{h}$	Kosten für Druckluft
K_{MA}	$\frac{€}{h}$	Kosten für Mitarbeiter
K_{NP}	$\frac{€}{h}$	Maschinenstundensatz zur Nachbereitung des Pulverwerkstoffs
K_P	$\frac{€}{kg}$	Kosten für Pulverwerkstoffe
k_s	%	Verluste beim Siebvorgang
K_S	€	Kosten für Schutzgas
$K_{SB,LBM}$	$\frac{€}{h}$	Stand-by-Stundensatz einer Laserstrahlschmelzanlage
K_{SP}	€	Kosten für Substratplatten
k_T	%	Verluste beim Separieren der Pulverwerkstoffe
k_V	%	Pulververluste beim Absaugprozess
m	-	Zahl des Probeköpers bei der Multimaterialprobenfertigung
$m_{A/B}$	kg	benötigte Masse von Material A bzw. B
$m_{K,A/B}$	kg	Masse des benötigten Pulvers von Material A bzw. B

Verzeichnis der Formelzeichen

$m_{P,Ab}$	kg	Masse des abgesaugten Pulvers
$m_{P,Auf}$	kg	Masse des aufzubereitenden Pulverwerkstoffs
m_{PBR}	kg	Masse des unverfestigten Pulvers im Bauraum
m_S	kg	Masse des abgesaugten Pulvers
m_{VP}	kg	Masse des fixen Pulververlusts
n	-	Werkstoffnummer
P_L	W	Laserleistung
R_M	MPa	Zugfestigkeit
$R_{P0,2}$	MPa	Streckgrenze
r_S	$\frac{kg}{h}$	Rate des Siebvorgangs
r_T	$\frac{kg}{h}$	Rate des Trennvorgangs
s	mm	Spurbreite
s_a	mm	Spurabstand
s_{auf}	mm	Länge der Strecke zum Auftragen des Pulverwerkstoffs
s_{ent}	mm	Länge der Strecke zum Entfernen des Pulverwerkstoffs
s_P	-	Sicherheitsfaktor zur Bestimmung des Pulverbedarfs
s_{sa}	mm	Spurüberlapp
s_v	mm	Länge der Strecke zum Anfahren von Positionen
T	°C	Temperatur
t_{Ab}	h	Zeit zum Abkühlen einer Laserstrahlschmelzanlage
t_{BP}	h	Dauer des Bauprozesses

Verzeichnis der Formelzeichen

t_{BV}	h	<i>benötigte Zeit zur Bauprozessvorbereitung</i>
t_{DV}	h	<i>benötigte Zeit zur Datenvorbereitung</i>
$t_{flächig}$	h	<i>Auftragszeit für flächige Auftragskonzepte</i>
t_{HF}	h	<i>benötigte Zeit zum Heizen und Fluten einer Laserstrahlschmelzanlage</i>
t_{HS}	h	<i>benötigte Zeit zur Handhabung des Siebvorgangs</i>
t_{HT}	h	<i>benötigte Zeit zur Handhabung des Trennvorgangs</i>
T_{HV}	$^{\circ}C$	<i>Vorheiztemperatur der Bauraumheizung</i>
t_{lokal}	h	<i>Auftragszeit für lokale Auftragskonzepte</i>
t_{NB}	h	<i>Zeit zur Nachbearbeitung des Bauteils</i>
t_{NM}	h	<i>Zeit zur Nachbereitung einer Laserstrahlschmelzanlage</i>
t_{NP}	h	<i>Zeit zur Nachbereitung des Pulverwerkstoffs</i>
t_{prod}	h	<i>Zeit für den gesamten additiven Fertigungsprozess</i>
$t_{V,A/B/C}$	h	<i>Verfestigungsdauer des Bauteilbereichs A/B/C</i>
$t_{V,ges}$	h	<i>Verfestigungsdauer des gesamten Bauteils</i>
v_{auf}	$\frac{mm}{s}$	<i>Verfahrgeschwindigkeit zum Auftragen des Pulverwerkstoffs</i>
$V_{B,A/B}$	mm^3	<i>Volumen von verfestigtem Material A/B im Bauteil</i>
V_{BR}	mm^3	<i>Volumen des Bauraums</i>
V_{BT}	mm^3	<i>Bauteilvolumen</i>
$V_{BT,A/B}$	mm^3	<i>Volumen des Monomaterialbereichs A/B eines Bauteils</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

$V_{BT,M}$	mm^3	<i>Volumen des Multimaterialbereichs eines Bauteils</i>
v_{ent}	$\frac{mm}{s}$	<i>Verfahrensgeschwindigkeit zum Entfernen des Pulverwerkstoffs</i>
$V_{Mono A/B}$	mm^3	<i>Pulvervolumen der Monomaterialbereiche A/B im Bauraum</i>
$V_{P,Ab}$	mm^3	<i>Volumen des abgesaugten Pulvers</i>
V_{PAuf}	mm^3	<i>Volumen des aufzubereitenden Pulverwerkstoffs</i>
$V_{PBR,M}$	mm^3	<i>Pulvervolumen des Multimaterialbereichs im Bauraum</i>
$V_{PV,A/B}$	mm^3	<i>Volumen von verfestigtem Material A/B</i>
v_s	$\frac{mm}{s}$	<i>Belichtungsgeschwindigkeit</i>
$V_{S,A/B}$	mm^3	<i>Volumen von verfestigtem Material A/B in den Stützstrukturen</i>
v_v	$\frac{mm}{s}$	<i>Verfahrensgeschwindigkeit zum Anfahren von Positionen</i>
z	-	<i>Zahl der Schichten in einem Bauteil</i>
$z_{A/B}$	-	<i>Anzahl der Schichten mit Monomaterialverarbeitung der Materialien A/B</i>
z_{Ab}	-	<i>Anzahl der Schichten, die im Multimaterialprozess abgesaugt werden</i>
z_{Multi}	-	<i>Anzahl der Schichten mit Multimaterialverarbeitung</i>
z_S	-	<i>Anzahl der abgesaugten Schichten</i>

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	$^{\circ}$	<i>Schüttwinkel</i>
ρ_{real}	$\frac{kg}{mm^3}$	<i>Dichte des gefertigten Bauteils</i>
$\rho_{Schütt}$	$\frac{kg}{mm^3}$	<i>Schüttdichte einer Werkstoffs</i>
σ_{Druck}	$\frac{N}{mm^2}$	<i>Druckspannung</i>
σ_{Zug}	$\frac{N}{mm^2}$	<i>Zugspannung</i>
ϵ_{th}	$\%$	<i>elastische Ausdehnung infolge einer thermischen Last</i>
ϵ_{pl}	$\%$	<i>plastische Verformung</i>
σ	$\frac{N}{mm^2}$	<i>Spannung</i>
λ	nm	<i>Wellenlänge</i>

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Forschung im Bereich neuer Materialien und Werkstoffe wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Zuge des Rahmenprogramms „Vom Material zur Innovation“ bis zum Jahr 2025 jährlich mit rund 100 Millionen Euro gefördert (BMBF 2015). Ursächlich sind die großen Potenziale die in der Entwicklung neuer Werkstoffe liegen. Beispielsweise können Bauteileigenschaften so optimiert werden, dass längere Standzeiten bei einer Reduzierung von Ausfallzeiten erreicht werden können. Diese führt zu einer erhöhten Produktivität, wodurch auch der Wirtschaftsstandort Deutschland gestärkt wird.

Im Rahmen der genannten Initiative kommt der Additiven Fertigung eine besondere Rolle zu. Aufgrund des aufbauenden Charakters dieser Technologien, bieten sie das Potential komplexe Strukturen herzustellen. Im Sinne der Ressourceneffizienz bieten sie nicht nur aus Werkstoff-Sicht großes Potenzial. Dieses ergibt sich zum einen durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, wie Aluminiumlegierungen (THIJS ET AL. 2013) oder Titanlegierungen (WIRTZ 2005). Zum anderen auch durch die Umsetzung von konstruktiven Leichtbauansätzen, wie beispielsweise der Funktionsintegration (RISS 2016).

Die additive Fertigung hat sich in den letzten Jahren aus einer Nischentechnologie hin zu einem Fertigungsverfahren entwickelt, das in einem industriellen Umfeld seinen Einsatz findet. Dies trifft insbesondere auf die Monomaterialverarbeitung zu. Die Herstellung von Bauteilen aus zwei verschiedenen Werkstoffen ist aktuell noch auf einen Materialwechsel in Aufbaurichtung begrenzt. Dies ist insbesondere der bestehenden Anlagentechnik zuzuschreiben, die einen Werkstoffwechsel in der Bauebene nicht zulässt. Erste Ansätze, das Potenzial pulverbettbasierter Technologien für die Herstellung von Multimaterialbauteilen mit einer beliebigen Materialverteilung in einer Bauebene auszunutzen, können in den Entwicklungen neuer Auftragskonzepte gesehen werden.

Ein noch nicht vollständig genutzter Aspekt des Leichtbaus ist der Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe in einem Bauteil. Die so genannte Multimaterialverarbeitung bietet das Potenzial Bauteile hinsichtlich ihrer Masse oder in ihren Eigenschaften zu optimieren. Potenzielle Einsatzfelder von Multimaterialbauteilen lie-

gen unter anderem in der Energie-, Elektro- oder Chemieindustrie (MAI & SPOWAGE 2004). Dies wird bereits mithilfe mehrerer Technologien, wie dem Fügen oder Gießen, ermöglicht. All diese Verfahren sind jedoch auf die Herstellung von einfachen Geometrien beschränkt.

Das Laserstrahlschmelzen, als eines in der Industrie am weitesten verbreiteten metall-basierten Fertigungstechnologien (WOHLERS 2018), weist infolge des Pulverbett-basierten Ansatzes das Potenzial auf, partikelgenau unterschiedliche Werkstoffe einzubringen und zu verfestigen. Somit wäre es möglich, hochkomplexe Bauteile mit einer beliebigen Materialverteilung im Bauteil herzustellen. Es ist ein sehr hoher Detaillierungsgrad der Materialverteilung derartiger Multimaterialbauteile zu erwarten. Dies bietet die Möglichkeit, Bauteileigenschaften lokal zu optimieren und somit beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit, die Härte, die Abriebfestigkeit oder den E-Modul anforderungsgerecht zu gestalten (ONUIKE ET AL. 2018). Auch erlaubt eine derartige Optimierung beispielsweise die Integration von elektrischen Komponenten wie Leiterbahnen oder auch komplexen Sensoren in Bauteile.

Eine Befähigung des LBM zur Herstellung von Multimaterialbauteilen würde es somit ermöglichen, filigrane und hoch komplexe Bauteile aus mehreren Werkstoffen herzustellen und somit die Funktionalität und Ressourceneffizienz einzelner Bauteile und Bauteilgruppen zu optimieren. Die Idee der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen wurde bislang jedoch noch nicht ganzheitlich, sondern nur unter dem Aspekt neuer Auftragskonzepte umgesetzt. Eine Betrachtung der gesamten Prozesskette, sowohl in Bezug auf die Anlagentechnik, als auch auf den Laserstrahlschmelzprozess, ist nicht erfolgt.

1.2 Zielstellung

Im Rahmen dieser Dissertation werden erste Ansätze der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen weiterentwickelt. Ziel dieser Arbeit ist es, notwendige Anpassungen der Laserstrahlschmelz-Prozesskette im Pre-, In- und Post-Prozess aufzuzeigen, Lösungsstrategien abzuleiten und deren Auswirkungen auf die Herstellung von Multimaterialbauteilen zu analysieren. Dies beinhaltet sowohl Aspekte des Fertigungsprozesses, als auch der Anlagentechnik. Am Ende der Arbeit ist der Leser in der Lage, Bauteile im Multimaterial-LBM-Prozess herzustellen.

Das Realisieren dieses Hauptziels impliziert die Beantwortung weiterer Fragestellungen. Damit es erreicht werden kann, müssen die in Abbildung 1-1 aufgezeigten Fragestellungen nach einander geklärt werden. Grundlage bildet hierbei die Identifikation von notwendigen Anpassungen im LBM-Prozess zur Herstellung von Multimaterialbauteilen. Hierbei ist zu klären, wie ein Materialauftrag erfolgen kann, wie sich die LBM-Multimaterial-Prozesskette gestaltet und auf welche Weise der Fertigungsprozess selbst beeinflusst wird. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Beantwortung nachfolgender Fragestellungen, welche bislang aufgrund der fehlenden Anlagentechnik und des nicht bestehenden Prozessverständnisses nicht möglich war. Eine ist, welche Werkstoffe im LBM-Prozess mit einander kombiniert werden können. Damit ein Anwender dies herausfinden kann, gilt es ein Vorgehen abzuleiten, um diese Frage allgemein klären zu können. Eine zweite Frage, die sich ergibt, wenn die Multimaterialverarbeitung in einem industriellen Umfeld Einsatz finden soll, ist welche Prozessschritte aus wirtschaftlicher Sicht aktuell als kritisch zu bewerten sind.

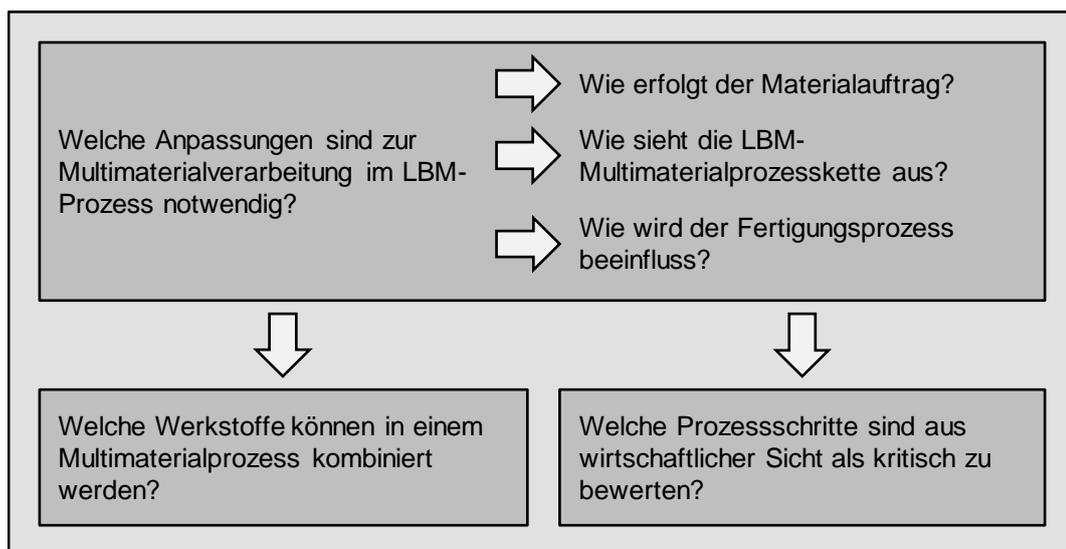


Abbildung 1-1: Fragestellungen, die im Rahmen der Arbeit geklärt werden

Für die Erreichung des Hauptziels, werden die aktuell im LBM-Prozess verarbeitbaren Werkstoffe als Randbedingungen herangezogen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden Grundlagen im Bereich der Multimaterialverarbeitung im LBM-Prozess geschaffen. Hierzu ist es zunächst notwendig, mittels konstruktiver Maßnahmen die Bedingungen für weiterführende Untersuchungen zu schaffen. Daher Bedarf es einem prototypischen Aufbau einer Multimaterial-LBM-Anlage. Dieser wird im Nachgang genutzt, um mittels Experimenten erste Erkenntnisse im Bereich der Multimaterialverarbeitung zu schaffen und auftretende Effekte basierend auf allgemein gültigen ingenieurwissenschaftlichen Erkenntnissen zu erklären. Dieser Teil der Arbeit ist einem kreativ-konstruktiven Dissertations-Typen zuzuordnen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden im zweiten Teil der Arbeit herangezogen, um eine allgemeingültige Handlungsanweisung abzuleiten, wie der Leser vorzugehen hat, um selbst festzustellen, ob zwei Werkstoffe im LBM-Prozess miteinander kombiniert werden können. Somit ist dieser Teil der Arbeit dem präskriptiven Typ zuzuordnen. Der gesamte Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1-2 übersichtlich dargestellt.

Damit die in Abschnitt 1.2 aufgeführten Fragestellungen geklärt werden können, wird zunächst in Kapitel 2 der Stand der Technik aufgezeigt und somit ein theoretisches Verständnis aufgebaut. Im Sinne eines empirischen Vorgehens werden basierend auf diesem Wissen, neu gewonnene Beobachtungen reflektiert und allgemeingültige Fragestellungen abgeleitet. Zur Erhebung von Daten kommen verschiedene Werkstoffe und Analysemethoden zum Einsatz. Diese werden vorab in Kapitel 3 erläutert. Dies schließt die Erzeugung, Qualifizierung und Beurteilung der Probekörper ein. Auf diese Weise ist es möglich, basierend auf wiederholbaren Versuchen und Analysen Daten zu erheben, zu analysieren und allgemeingültige Zusammenhänge abzuleiten. So wird ein theoretisches Verständnis aufgebaut, welches in Folgearbeiten genutzt werden kann, um neu entstehende oder offene Fragestellungen zu klären.

Kapitel 4 greift den aktuellen Stand der Technik insbesondere aus Abschnitt 2.2.3 auf und gibt einen Leitfaden zur Auswahl eines Auftragskonzepts, welches eine LBM-Anlage befähigt, Bauteile aus mehreren Werkstoffen herzustellen. Hierzu wird zunächst ein Klassifizierungssystem eingeführt, welches auf charakteristischen Eigenschaften der Auftragssysteme basiert (Abschnitt 4.1). Anhand allgemeingültiger Kriterien und Anforderungen (Abschnitt 4.2) kann somit ein Auftragskonzept ausgewählt werden (Abschnitt 4.3). Das abgeleitete Vorgehen wird abschließend anhand eines Beispiels plausibilisiert (Abschnitt 4.4).

Nachdem ein Auftragsmechanismus ausgewählt wurde, müssen die Einflüsse auf den Pre- (Abschnitt 5.1), In- (Abschnitt 5.2) und Post-Prozess (Abschnitt 5.3) identifiziert und analysiert sowie anschließend Lösungsstrategien aufgezeigt werden, damit ein Multimaterialbauteil unter Einsatz eines entsprechenden Auftragskonzepts entstehen kann. Diese werden in Kapitel 5 dargelegt.

Einen großen Einfluss hat die Multimaterialverarbeitung auf den In-Prozess. Daher werden in Kapitel 6 experimentell Einflussgrößen auf den Fertigungsprozess identifiziert (Abschnitt 6.1), hieraus basierend auf den Erkenntnissen des Monomaterialprozesses mögliche Steuergrößen abgeleitet (Abschnitt 6.2) und deren Einfluss durch die Herstellung und Untersuchung von Probekörpern auf den LBM-Prozess analysiert (Abschnitt 6.3). Im Sinne einer kritischen Reflexion der Ergebnisse wird in Abschnitt 6.4 der Einfluss von Störgrößen auf den Multimaterial-Prozess betrachtet. Am Ende des Kapitels können im LBM-Prozess Multimaterialbauteile hergestellt werden.

Das so generierte Wissen aus den Kapiteln 5 und 6 wird in Abschnitt 7.1 genutzt, um ein allgemeingültiges Vorgehen zu entwickeln, welches es ermöglicht Aussagen über die Kombinierbarkeit unterschiedlicher Werkstoffe im Laserstrahlschmelzprozess zu treffen. Anhand eines Beispiels wird das Vorgehen plausibilisiert und die Ergebnisse anhand des Standes der Technik reflektiert (Abschnitt 7.2). Somit gibt Kapitel 7 eine Möglichkeit für alle Werkstoffkombinationen die Fragestellung nach ihrer Kombinierbarkeit im LBM-Multimaterial-Prozess zu beantworten.

Die dritte Fragestellung nach kritischen Prozessschritten im Zuge einer industriellen Anwendung wird in Kapitel 8 betrachtet. Hierzu wird zunächst basierend auf dem aktuellen Stand der Technik ein Kostenmodell aufgestellt (Abschnitt 8.1). Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Szenarien werden kritische Prozessschritte identifiziert (Abschnitt 8.2). Um dem Leser eine ganzheitliche Betrachtung des LBM-Multimaterial-Prozesses zu ermöglichen, werden in Abschnitt 8.3 die technologischen Potenziale betrachtet.

Die Arbeit wird mit einer Schlussbetrachtung (Kapitel 9) abgeschlossen. Alle in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse werden in Abschnitt 9.1 zusammengefasst, im Zuge eines Resümees reflektiert (Abschnitt 9.2) und hieraus der Ausblick mit offenen Fragestellungen abgeleitet (Abschnitt 9.3).

Kapitel 1		
Einleitung		
1) Motivation	2) Zielstellung	3) Aufbau der Arbeit
Kapitel 2		
Stand der Forschung und Technik		
1) Additive Fertigung		3) Multimaterialverarbeitung
2) Laserstrahlschmelzen		4) Pulverseparierung
Kapitel 3		
Werkstoffe und angewendete Methoden		
1) Werkstoffe		2) Angewendete Methoden
Kapitel 4	Kapitel 5	Kapitel 6
Auswahl eines Auftragsmoduls	Die LBM-Multimaterial-Prozesskette	Entwicklung der Multimaterial-prozessparameter
1) Klassifizierung Auftragskonzepte	1) Multimaterial Pre-Prozess	1) Identifikation von Einflussgrößen
2) Kriterien und Anforderungen zur Auswahl	2) Multimaterial In-Prozess	2) Identifikation von Steuergrößen
3) Auswahl eines Auftragskonzeptes	3) Multimaterial Post-Prozess	3) Analyse von Steuergrößen
4) Plausibilisierung		4) Analyse der Störgrößen
Kapitel 7		
Qualifizierung 3-D-Multimaterialkombinationen		
1) Vorgehen zur Qualifizierung		2) Plausibilisierung
Kapitel 8		
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung		
1) Entwicklung des Kostenmodell	2) Szenarienanalyse	3) Technologische Potenziale
Kapitel 9		
Schlussbetrachtung		
1) Zusammenfassung	2) Resümee	3) Ausblick

Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung und der Technik

2.1 Additive Fertigung

Additive Fertigung unterscheidet sich in der Art der Bauteilerzeugung von anderen Fertigungsverfahren. Hierbei werden Bauteile durch ein Hinzufügen von Material erzeugt. Im Gegensatz hierzu stehen subtraktive Verfahren, wie beispielweise das Drehen oder Fräsen. Additive Verfahren umschließen unterschiedliche Technologien, die durch ein schichtweises Hinzufügen von Material hochkomplexe Geometrien erzeugen können. Der erzeugende Charakter dieser Technologien ermöglicht es, ohne den Einsatz von Werkzeugen Bauteile herzustellen. Hierdurch kann die Produktionszeit stark verkürzt werden, weswegen einer der ersten Einsatzbereiche auch im Rapid Prototyping lag. Die verschiedenen Verfahren können je nach Aggregatzustand des Ausgangsmaterials – fest, flüssig oder gasförmig – kategorisiert werden (GEBHARDT 2017) (siehe Abbildung 2-1).

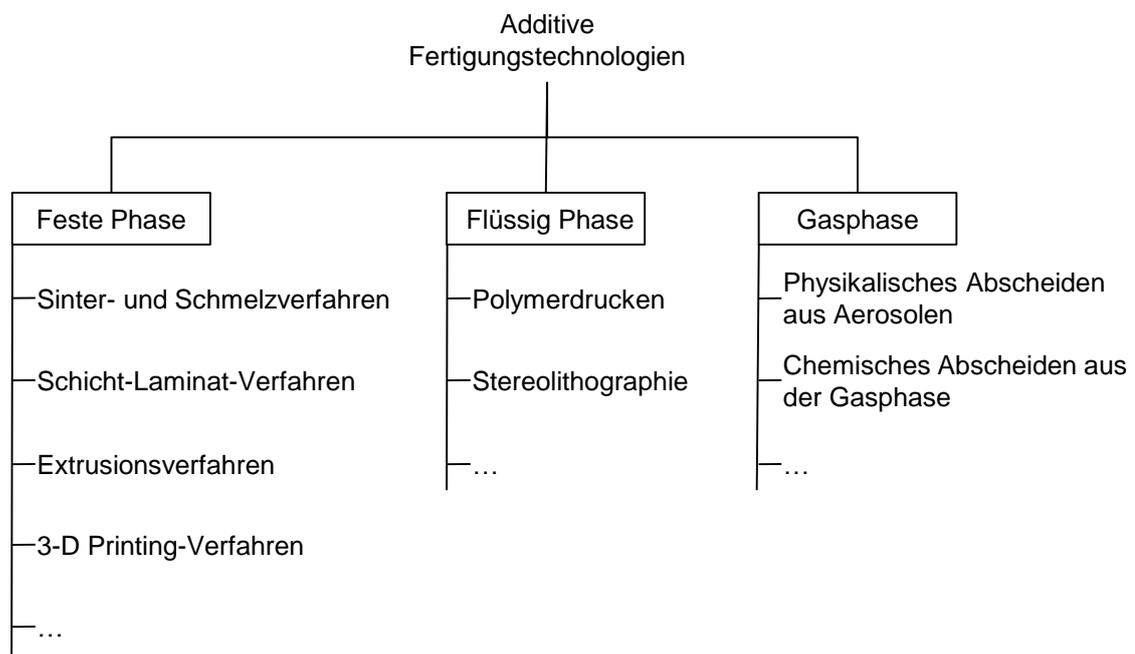


Abbildung 2-1: Einteilung additiver Fertigungsverfahren (GEBHARDT 2017)

Ausgangsbasis für alle additiven Fertigungsverfahren ist ein CAD-Modell, von dem mittels Triangulation ein Oberflächenmodell erstellt wird. Dieses wird in einzelne Schichten zerlegt. Als Ergebnis der Datenvorbereitung, die im Pre-Prozess erfolgt, erhält man somit ein Schichtmodell des CAD-Modells (GIBSON ET AL. 2010).

Dieses ist die Ausgangsbasis für den additiven Fertigungsprozess. Hieran schließt sich der Fertigungsprozess (In-Prozess) an, währenddessen die eigentliche additive Fertigung, also der schichtweise Aufbau des Bauteils erfolgt. Abgeschlossen wird die Prozesskette mit dem Post-Prozess, welcher alle Folgearbeiten, wie das Ausbauen des Bauteils aus dem Bauraum sowie die mechanische oder thermische Nachbehandlung, enthält (VDI 3405). Die gesamte Prozesskette ist in Abbildung 2-2 zu sehen.



Abbildung 2-2: Additive Prozesskette nach VDI 3405

Ein in der Industrie bereits weit verbreitetes Verfahren ist das Laserstrahlschmelzen (WOHLERS ASSOCIATIONS 2016). Im Rahmen dieser Arbeit soll diese Technologie eingesetzt werden, weswegen im folgenden Abschnitt weiter darauf eingegangen wird.

2.2 Laserstrahlschmelzen

2.2.1 Prozesstechnische Grundlagen

Mithilfe eines fokussierten Laserstrahls wird metallisches Pulver selektiv aufgeschmolzen und zu definierten Bauteilen aus der Schmelze verfestigt. Das Pulver wird mithilfe eines Auftragsmechanismus in homogenen Schichten definierter Dicke auf der Bauplattform aufgebracht (siehe Abbildung 2-3). Nach dem Verfestigen wird die Bauplattform um die Höhe einer Schicht abgesenkt und erneut Pulver aufgebracht. Das nicht verfestigte Material verbleibt bis zur Fertigstellung des gesamten Bauteils im Bauraum. Um den Wärmetransport und die Anbindung des Bauteils an die Bauplattform sicherzustellen, ist es insbesondere bei überhängenden Bereichen des Bauteils notwendig, Stützstrukturen vorzusehen. Nach Fertigstellung des Bauprozesses kann das nicht verfestigte Pulver mittels Sieben aufbereitet und anschließend wiederverwendet werden (VDI 3405).

Um eine Oxidation des Pulverwerkstoffs, des Schmelzbades oder des bereits gefertigten Bauteils zu vermeiden, herrscht während des Fertigungsprozesses eine Schutzgasatmosphäre (Argon- oder Stickstoffatmosphäre) im Bauraum. Zusätzlich wird mithilfe des Schutzgases eine Strömung im Bauraum erzeugt, die es erlaubt, Schmauchpartikel und entstandene Spritzer aus dem Bauraum zu entfernen. Während des Verfestigungsprozesses werden unter der aufgetragenen Pulverlage liegende, bereits verfestigte Materialbereiche mit aufgeschmolzen. So wird eine

kontinuierliche Verbindung zwischen den einzelnen Schichten sichergestellt (CARTER ET AL. 2014).

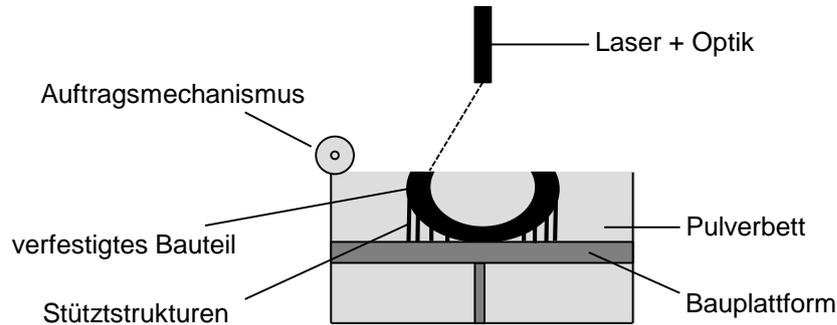


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des Bauraums einer Laserstrahlschmelzanlage (in Anlehnung an VDI 3405)

Grundvoraussetzung zur Fertigung eines Bauteils ist die Erzeugung eines Schmelzbades. Hierfür wird mittels des Laser Wärmeenergie in das Material eingebracht. Abhängig von den Materialeigenschaften und der eingesetzten Wellenlänge des Laserstrahls wird jedoch nur ein Teil der Energie absorbiert. Die restliche Energie wird reflektiert (Abbildung 2-4). Da keine glatten Oberflächen vorliegen, wird die Strahlung bei gestreut wodurch sich der Strahl aufweitet. Für das Laserstrahlschmelzen hat sich ein Wellenlängenbereich von 1000–1100 nm etabliert, da die meisten metallischen Werkstoffe die Wellenlänge dieser Laser im Vergleich zu anderen verfügbaren am besten absorbieren können (MEINERS 1999, GLARDON ET AL. 2001). Beispielsweise liegt die Absorptionsrate von Werkzeugstahl 1.2709 bei 49 % (GLARDON ET AL. 2001).

Zum Aufschmelzen wird die Energie der elektromagnetischen Wellen vom Werkstoff absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Diese wird im Pulverbett, im Schmelzbad und an der Bauteiloberfläche mittels Wärmeleitung, Konvektion sowie Strahlung weitergeleitet. Der Wärmefluss ist im festen Material und im Pulverbett nicht konstant. Abhängig von den Materialeigenschaften, der Wärmeleitfähigkeit der mit Gas gefüllten Zwischenräume im Pulverbett sowie der Partikelgrößenverteilung und der damit verbundenen geringeren relativen Dichte von ca. 55–63 % des Pulverbetts (KARAPATIS ET AL. 1999), hat das Pulverbett eine geringere Wärmeleitfähigkeit als der aufgeschmolzene und wiederverfestigte Werkstoff (GUSAROV & SMUROV 2010). Beispielsweise liegt die Wärmeleitfähigkeit von pulverförmigem Inconel 718 nach SEIDEL (2017) 97,7 % unter dem entsprechenden Wert des verfestigten Werkstoffs. Dieser Wert wurde basierend auf Messungen der Temperaturleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte

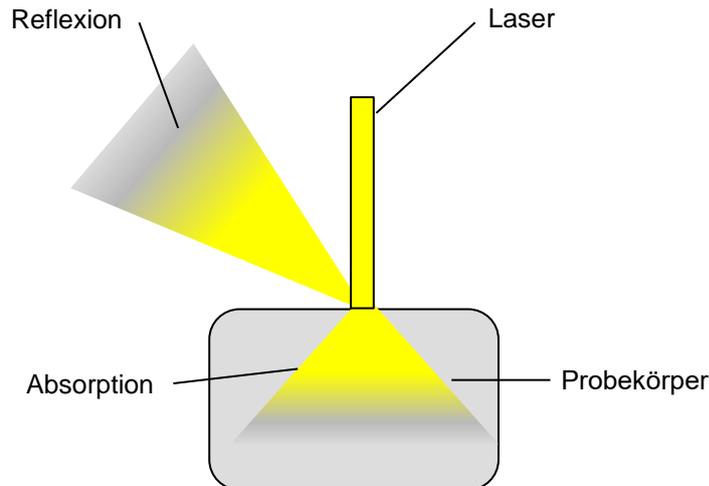


Abbildung 2-4. Vereinfachte Darstellung Reflexion und Absorption der Laserenergie durch Probekörper (in Anlehnung an KRAUSS 2016)

bei Raumtemperatur berechnet. Aufgrund der veränderten Wärmeleitungseigenschaften während des Prozesses so, dass nach der Verfestigung die Wärmeleitfähigkeit steigt.

Aufgrund der Zusammenhänge von Energieabsorption und Wärmeleitung im Pulverbett und verfestigtem Bauteil haben die thermischen und optischen Eigenschaften einen besonders hohen Einfluss auf das Aufschmelzpotenzial eines Werkstoffs (GUSAROV & SMUROV 2010). Sie beeinflussen maßgeblich die Stabilität des erzeugbaren Schmelzbades und damit die Größe eines Prozessfensters. Liegt beispielsweise eine hohe thermische Leitfähigkeit und eine niedrige Absorptionsrate der Laserenergie im ausgewählten Wellenlängenbereich vor, wird das Erzeugen eines Schmelzbades erschwert. Das ist beispielsweise bei Kupfer für Wellenlängen von ca. 1064 nm der Fall (BECKER 2014, BEAL 2005, p, POGSON ET AL. 2003).

Das Laserstrahlschmelzen ist ein dynamischer Prozess, welcher schematisch in Abbildung 2-5 dargestellt ist. Am Ort des höchsten Energieeintrags, dem Zentrum des Laserstrahls, verdampft Material. Dies verursacht aufgrund ihrer hohen Temperatur eine Gasströmung aus dem Schmelzbad heraus. Dieser Gasstrom fördert während des Prozesses unaufgeschmolzene Partikel oder Spritzer, aus dem Schmelzbad in den restlichen Bauraum (DI WANG ET AL. 2017, LIU ET AL. 2015, KHAIRALLAH ET AL. 2016).

Ein weiteres Zeichen der Dynamik zeigt sich in der Schmelzphase, in der aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen eine Marangoni-Strömung entsteht. Diese bewirkt, dass nicht nur die Partikel aufgeschmolzen werden, die unmittelbar in der

Belichtungsbahn des Laserstrahls liegen, sondern auch Partikel, welche an diese Bahn angrenzen, mit in das Schmelzbad gezogen werden (KHAIRALLAH ET AL. 2016).

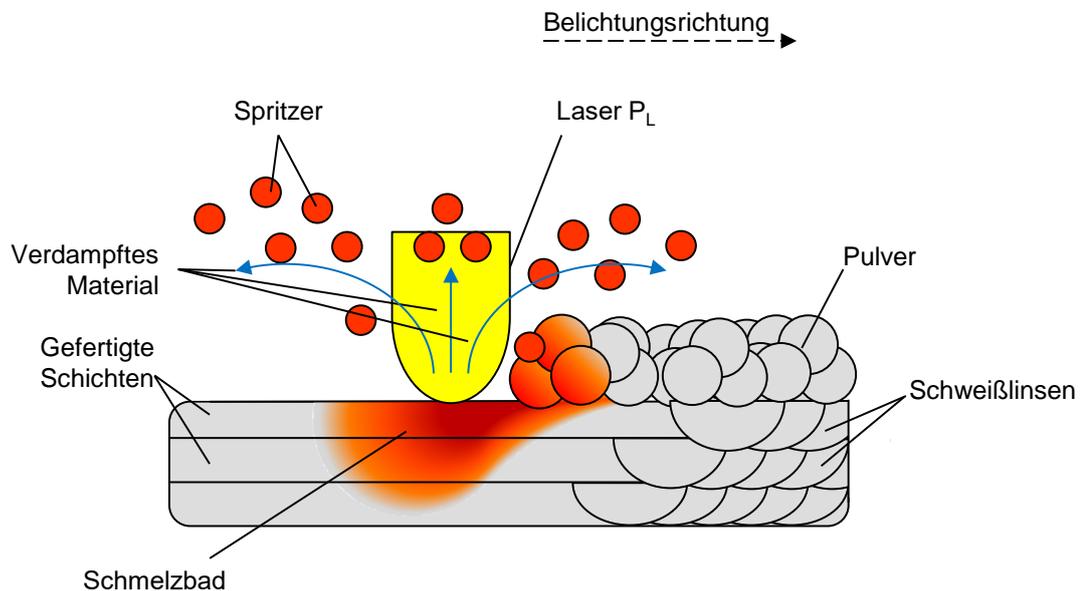


Abbildung 2-5: Prinzipdarstellung des Laserstrahlschmelzens

Damit die Energie, die für einen korrekten Aufschmelzvorgang benötigt wird, in das Material eingebracht werden kann, müssen verschiedene Prozessparameter korrekt eingestellt werden.

2.2.1.1 Prozessparameter

Prozessseitig wird das Laserstrahlschmelzen von über 160 Parametern bestimmt (REHME 2009, ZERBST & HILGENBERG 2017), wobei die Laserleistung (P_L) und die Belichtungsgeschwindigkeit (v_s) den größten Einfluss haben. Zusätzlich müssen noch der Spurbstand (s_a) und die Schichtdicke (h_s) berücksichtigt werden, da diese in engem Zusammenhang mit den zwei erstgenannten Parametern stehen (REHME 2009, KNIFFKA ET AL. 2016, ZERBST & HILGENBERG 2017). Diese Parameter sowie zusammengesetzte Einflussgrößen, die sich aus diesen berechnen lassen, werden folgend vorgestellt.

Laserleistung

Abhängig von Anlagenhersteller und Größe der Anlage werden Laser mit einer Leistung von 50–1000 W eingesetzt. Eine falsch eingestellte Laserleistung P_L führt

entweder – bei zu geringer Laserleistung – zu einem nicht ausreichenden Aufschmelzen der Pulverpartikel oder – bei zu hoher Laserleistung – zu einer verstärkten Spritzerbildung oder gar zu Evaporation des Materials (LIU ET AL. 2015).

Belichtungsgeschwindigkeit

Die Belichtungsgeschwindigkeit (v_s) (auch Scangeschwindigkeit genannt) gibt an wie schnell sich der Laserstrahl über die Bauebene bewegt. Sie beeinflusst unter anderem maßgeblich die Breite der Schmelzbahn. Bei falscher Geschwindigkeit kann es zum Abbruch des Schmelzbades oder dem sogenannten Balling-Effekt (GU & SHEN 2007) und somit zu Fehlstellen im späteren Bauteil kommen (GONG ET AL. 2014).

Spurabstand

Der Spurabstand s_a definiert den Abstand zwischen zwei Schmelzbahnen (OVER 2003). Um ein Bauteil mit hoher Dichte zu erzeugen, sollten die Schmelzbahnen nach EISEN (2010) bei ca. 33% überlappen, während MUTUA ET AL. (2018) einen Spurüberlapp zwischen 16 und 40% für die Verarbeitung von 18Ni (300-grade) identifiziert haben. Auf diese Weise ist es möglich, ein Bauteil ohne Fehlstellen zwischen zwei Schmelzbahnen zu erzeugen. Auch vermindert ein kleiner Spurabstand das Risiko einer Fehlstelle beispielweise infolge einer veränderten Intensitätsverteilung der Laserstrahlung, wie sie aufgrund eines laserinduzierten Fokusversatzes auftreten kann (KUESTERS ET AL. 2011).

Schichthöhe

Die Schichthöhe h_h hat einen Einfluss auf die Abbildungsgenauigkeit in Aufbaurichtung, da sie in direktem Zusammenhang mit dem sogenannten Treppenstufeneffekt steht (siehe Abbildung 2-6). Der Treppenstufeneffekt beschreibt die Abweichung von Konturen in Aufbaurichtung, die infolge des schichtweisen Aufbaus in diskrete Bereiche unterteilt werden. Im fertigen Bauteil ist daher die gefertigte Kontur mit einer Treppenstufe vergleichbar. Wird eine geringe Schichtdicke gewählt, bildet sich eine geringere Treppenstufenhöhe aus als bei einer größeren Schichtdicke (GEBHARDT 2017). Gleichzeitig korreliert die Aufbaudauer mit deren Höhe. Es können kürzere Fertigungszeiten mit einer größeren Schichtdicke erreicht werden (VDI 3405 2015). Neben diesen konstruktiven und ökonomischen Aspekten, muss bei der Wahl der Schichtdicke auch die Anbindung an die darunterliegenden Schichten sichergestellt werden. Bei einer zu großen Schichtdicke kann ggf. die Laserleistung nicht ausreichend sein, um die darunterliegenden Schichten mit aufzuschmelzen, und somit auch keine Verbindung zwischen den

einzelnen Schichten herstellen (WIRTZ 2005, VAN ELSSEN 2007). Deshalb ist die Schichtdicke immer so zu wählen, dass eine hinreichend gute Abbildungsgenauigkeit bei minimaler Fertigungsdauer und guter Verbindung zwischen den einzelnen Schichten erzielt werden kann.

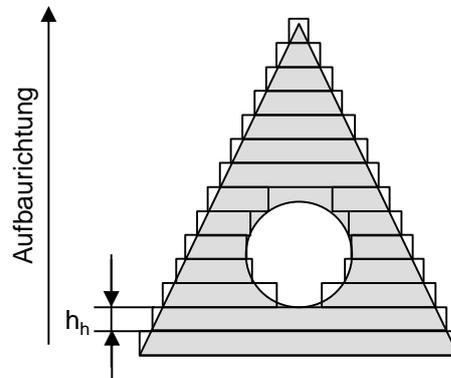


Abbildung 2-6: Darstellung des Treppenstufeneffekts in Anlehnung an (VDI 3405 2015)

Zusammengesetzte Parameter

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Prozessparameter für unterschiedliche Werkstoffe herstellen zu können, wurden drei Parameter definiert, welche sich aus den vorher genannten Einflussgrößen Laserleistung P_L , Belichtungsgeschwindigkeit v_s , Schichtdicke h_s und Spurabstand s_a ableiten lassen. Zunächst sei hier die Streckenenergiedichte E_S genannt. Diese ergibt sich aus dem Quotienten der Laserleistung und der Belichtungsgeschwindigkeit und spiegelt somit die durchschnittliche Energiemenge wider, die zum Aufschmelzen einer Laserspur benötigt wird (siehe Formel (2-1)).

$$E_S = \frac{P_L}{v_s} \quad (2-1)$$

Wird diese Betrachtung noch um den Einfluss des Spurabstands erweitert, kann die Flächenenergiemenge E_F bestimmt werden (siehe Formel (2-2)).

$$E_F = \frac{P_L}{v_s \cdot s_a} \quad (2-2)$$

Zur Bestimmung der Volumenenergie E_V als Referenzwert für die Energiemenge, die in einen dreidimensionalen Körper eingebracht werden muss, wird zudem noch die Schichtdicke mitberücksichtigt. Somit ergibt sich diese aus dem Quotienten

der Laserleistung P_L und dem Produkt aus Belichtungsgeschwindigkeit v_s , Spurabstand s_a und Schichtdicke h_h (siehe Formel (2-3)) (MEINERS 1999).

$$E_v = \frac{P_L}{v_s \cdot s_a \cdot h_h} \quad (2-3)$$

Anhand dieser Formeln wird auch ersichtlich, dass beispielsweise eine höhere Schichtdicke eine Anpassung der anderen Parameter fordert, um dieselbe Energie in ein Bauteil zu induzieren. Dies verdeutlicht auch die Wichtigkeit, richtige Prozessparametersätze zu wählen. Kommt in einem Bauprozess die falsche Parameterkombination zum Einsatz, kann dies beispielsweise zu Fehlstellen im Bauteil führen (CASALINO ET AL. 2015).

Einer der am häufigsten auftretenden Defekte im Laserstrahlschmelzen sind beispielweise Fehlstellen. Je nach dem Ort ihrer Entstehung können verschiedene Arten und Ursachen unterschieden werden. Am Ende einer Schmelzbahn oder infolge eines zu tiefen Schmelzbades kann dieses in sich kollabieren und zu sog. Key-Hole-Poren führen (THIJS ET AL. 2013). Dies können beispielsweise als Folge von zu hoher Laserleistung P_L entstehen. Weitere Ursachen können unaufgeschmolzene Bereiche zwischen zwei Schmelzbahnen aufgrund deren Schrumpfung sein (THIJS ET AL. 2010, GU & SHEN 2007). Kontrolliert werden kann dies über den Spurabstand. Die dritte Art von Fehlstellen stellt sich als offene Fehlstelle dar, welche durch ein nicht vollständiges Aufschmelzen der darunterliegenden Schicht entstehen (QIU ET AL. 2013). Dies kann durch eine langsamere Belichtungsgeschwindigkeit v_s oder eine höhere Laserleistung P_L behoben werden. Zusätzlich können prozesstechnische Effekte wie Balling auftreten. Hierunter wird das Formen von Kugeln aus der Schmelze verstanden. Diese entstehen beispielsweise, wenn eine zu hohe Laserleistung in Verbindung mit einer niedrigen Belichtungsgeschwindigkeit eingesetzt wird, oder aufgrund großer thermischer Gradienten (GU & SHEN 2007).

2.2.1.2 Resultierende Bauteileigenschaften

Während des Fertigungsprozesses entstehen Eigenspannungen. Diese Spannungen verbleiben im Bauteil, nachdem sich ein Spannungsgleichgewicht eingestellt hat, und können hierdurch dessen Belastbarkeit im Einsatz beeinflussen. Allgemein können Eigenspannungen nach WITHERS & BHADESHIA) in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Typ I: Spannungen, die im gesamten Bauteil vorliegen

- Typ II: Spannungen, die im Bereich einiger Körner vorliegen
- Typ III: Spannungen, die im Bereich einiger Atome vorliegen

Nach KRUTH ET AL. (2012) sind im LBM-Prozess primär lokale Temperaturgradienten verantwortlich für die Entstehung von Eigenspannungen, welche dem Typ I zugeordnet werden können. Um dieses Verhalten zu erklären, existieren zwei Modelle: das Temperaturgradienten-Modell (TGM) und das Cool-Down Phase Model (CDPM). Beide Modelle sind in Abbildung 2-7 grafisch dargestellt.

TGM:

Dieses Modell setzt eine geringe Wärmeleitfähigkeit im Bauteil voraus. Hierdurch entstehen große Temperaturgradienten zwischen der losen Pulverschicht und dem bereits verfestigten Bauteil. Wird nun die Pulverschicht durch die Energie der Laserstrahlung erwärmt, so dehnt sich die Pulverschicht aus (ϵ_{th}). Dieses Verhalten wird allerdings durch das umgebende Material behindert, wodurch elastische Druckspannungen entstehen. Im Abkühlprozess bewirkt dies Zugspannungen an der Oberfläche des Bauteils σ_{Zug} , da die Verformung durch die darunterliegenden Schichten blockiert wird. Um nun ein Spannungsgleichgewicht zu erhalten, entstehen im darunterliegenden Bereich Druckspannungen σ_{Druck} . Dieser Effekt wird zusätzlich durch eine niedrigere elastische Fließgrenze im erwärmten Zustand begünstigt, wodurch zu einer rein elastischen Verformung bei bereits geringer Last ein plastischer Anteil ϵ_{pl} hinzukommt (BRANNER 2011, MERCELIS & KRUTH 2006).

CDPM:

Das CDPM sieht die Ursache für Eigenspannungen in der Abkühlphase des Fertigungsprozesses. Hierbei wird das Schrumpfen der gefertigten Spur durch die darunterliegenden bereits verfestigten Schichten blockiert. So entstehen in der obersten Schicht z Zugspannungen und in darunterliegenden Schichten ($z-1$) Druckspannungen. Durch den schichtweisen Aufbau verändert sich der Spannungszustand kontinuierlich. Einen großen Einfluss auf die Spannungen haben die Schichtdicke und die Materialeigenschaften der Bauplatte (MEINERS 1999, MERCELIS & KRUTH 2006, SHIOMI ET AL. 2004).

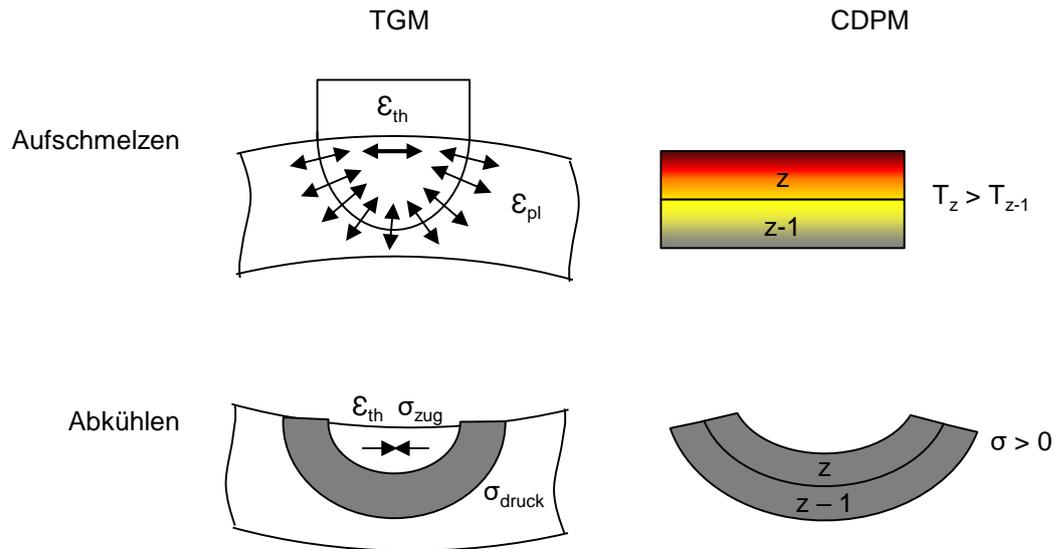


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Eigenspannungsmodelle im Laserstrahlschmelzprozess. Links: TGM, rechts: CDPM (in Anlehnung an KRAUSS (2016))

Typ II-Eigenspannungen treten in Bereichen um mehrere Körner auf. Diese können vor allem bei der Verbindung von unterschiedlichen Werkstoffen, wobei die Ursachen beispielsweise in unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen oder thermischen Ausdehnungskoeffizienten liegen. Bei zeitgleicher Verarbeitung wird hierdurch das Schrumpfen im Abkühlprozess verhindert (GUZMÁN & HERNÁNDEZ ARROYO 2016).

Exakte Voraussagen zur Höhe der Eigenspannungen bezogen auf die Materialeigenschaften, können nicht getroffen werden, da dies beispielsweise auch von einer Oxidbildung während des Prozesses abhängig ist (VRANCKEN ET AL. 2013).

Eigenspannungen wirken sich auf die Qualität und Maßhaltigkeit des Bauteils aus. Zum einen äußern sie sich in Form von Rissbildung. Die Gefahr der Rissbildung besteht insbesondere bei harten und spröden Werkstoffen oder Materialien mit hohen Schmelztemperaturen (ALKAHARI ET AL. 2012). Zum anderen führen sie zu Verzug und Schwund, somit zu einem Abweichen der Ist-Kontur von der Soll-Kontur des Bauteils (MUNSCH 2013). Eine Minimierung ist beispielsweise durch eine angepasste Belichtungsstrategie möglich. So konnten MASOOMI ET AL. (2017) und MASOOMI ET AL. (2018) mittels Simulationen zeigen, dass Temperaturgradi-

enten und damit verbunden auch die Eigenspannungen am Ende einer Schmelzbahn geringer sind als am Anfang. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Spannungen im Inneren eines Bauteils geringer sind als an dessen Oberfläche.

2.2.2 Prozessqualifizierung

Aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften ist es notwendig, jeden Werkstoff für den LBM-Prozess zu qualifizieren. Hierunter wird ein methodisches Vorgehen verstanden, bei welchem verschiedene Prozessparameter (siehe Abschnitt 2.1) variiert werden mit dem Ziel, Bauteile mit einer relativen Dichte von mehr als 99 % zu erreichen, wobei gleichzeitig im Bauteil auch keine Risse auftreten sollen. Wird dieser Wert erreicht oder gar überschritten, kann davon ausgegangen werden, dass additiv gefertigte Bauteile vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen wie konventionell produzierte (VDI Richtlinie 3405, CASALINO ET AL. 2015). Um eine erste Qualifizierung des Werkstoffs für den Laserstrahlschmelzprozess zu ermöglichen, hat beispielsweise YADROITSEV ET AL. (2015) das in Abbildung 2-8 dargestellte Vorgehen entwickelt. Weitere Ansätze zur Ermittlung geeigneter Prozessparameter gibt es von EISEN (2010), KEMPEN ET AL. (2011b) oder CASALINO ET AL. (2015).

Im ersten Schritt werden Einzelspuren gefertigt. Hierbei werden die Laserleistung, die Belichtungsgeschwindigkeit sowie die Schichtdicke variiert. Das Ziel ist es, eine zusammenhängende Schmelzbahn zu fertigen. Hierbei sollte eine Verbindung mit der darunterliegenden Grundplatte erzeugt werden, die ungefähr 30–50 % der gesamten Schmelzhöhe beträgt. Gleichzeitig müssen allerdings eine zu große Einschweißtiefe oder Effekte wie Balling vermieden werden.

Im nächsten Schritt werden Einzelschichten erzeugt, d.h. mehrere Einzelspuren werden so parallel zueinander gefertigt, dass eine geschlossene Ebene entsteht. Hierzu ist es notwendig, den Spurabstand zu variieren und die Belichtungsstrategie anzupassen. Beispiele für Belichtungsstrategien sind die Streifenbelichtung und die Schachbrettstrategie (CHENG ET AL. 2016). Ziel ist es, eine geschlossene Schicht zu erzeugen, bei der die Spurhöhe und der wiederaufgeschmolzene Bereich größer sind als die aufgebrauchte Schicht sowie die Höhenunterschiede zwischen den einzelnen Schmelzbahnen.

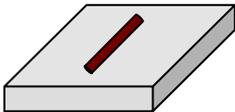
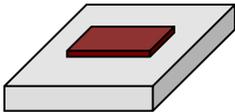
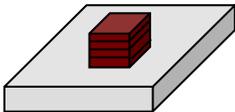
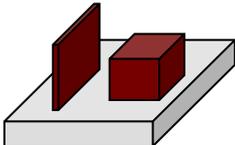
		Steuergrößen	Zielgrößen
1. Einzelspur		P_L, v_s, h	Kontinuierliche Schmelzbahn
2. Einzelschicht		s_a , Belichtungsstrategie	Spurhöhe + wiederaufgeschmolzener Bereich > aufgebrauchte Schicht + Taltiefe
3. 3-D-Objekt			<ul style="list-style-type: none"> • Keine Porenketten • Keine große Poren • Keine Poren zwischen Schichten
4. Parameteroptimierung	 <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">Grundplatte</div> <div style="background-color: red; color: white; padding: 2px 5px;">Bauteil</div> </div>		<ul style="list-style-type: none"> • Filigrane/großflächige Strukturen • Mechan. Eigenschaften • Aufbaurrate • Verzugsminimierung

Abbildung 2-8: Vorgehen zur Qualifizierung von Werkstoffen für den Laserstrahlschmelzprozess in Anlehnung an YADROITSEV ET AL. (2015) und KUESTERS ET AL. (2011)

Als Drittes werden dreidimensionale Körper bestehend aus mehreren Schichten gefertigt. Bei der Analyse dieser Proben sollten keine Porenketten, große Poren oder Poren zwischen zwei Schichten zu erkennen sein. Nur dann kann die angestrebte relative Dichte von 99 % erreicht werden. Je nach detektiertem Fehlerbild müssen vorangegangene Prozessschritte wiederholt und die Prozessparameter optimiert werden, um das genannte Ziel zu erreichen.

Das mithilfe des gezeigten Vorgehens identifizierte Parameterfenster kann unter verschiedenen Aspekten weiter optimiert werden. Diese können beispielsweise

- filigrane oder großflächige Strukturen,
- mechanische Eigenschaften,

- Aufbaurrate oder
- Verzugsminimierung

sein. Diese Aspekte wurden beim Vorgehen nach KUESTERS ET AL. (2011) mitberücksichtigt. Hier werden nach dem Aufbau von Dichtewürfeln auch noch Parameter für die Außenkontur sowie der Schrumpfungsfaktor bestimmt. Bei allen Zielgrößen sollte auf eine maximale relative Dichte geachtet werden.

2.2.3 Auftragsmechanismen für das Laserstrahlschmelzen

Ausgangsbasis zur Ermöglichung der Multimaterialverarbeitung mittels LBM ist die Adaption des bestehenden Auftragsmoduls. Dies beschreibt die Einheit einer LBM-Anlage, die den Pulverauftrag während eines Fertigungsprozesses durchführt. Daher ist es notwendig, den bestehenden Ansatz, wie er in Abschnitt 2.1 beschrieben ist, zu verändern oder an die Anforderungen infolge weiterer Materialien anzupassen. Zurzeit gibt es unterschiedliche Ansätze, die von verschiedenen Forschergruppen untersucht werden. Ein Überblick wird von VAEZI ET AL. (2013) gegeben. Im Folgenden wird auf drei Verfahren eingegangen, die in den pulverbettbasierten Technologien derzeit den größten Einsatz finden.

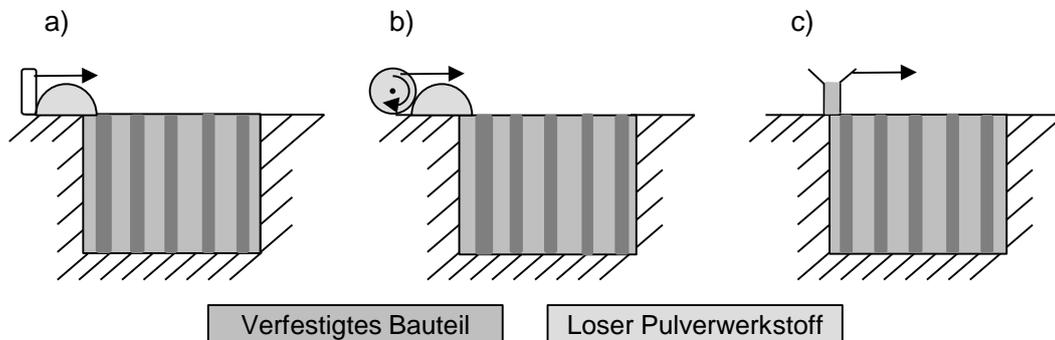


Abbildung 2-9: Beschichtersystem für den Auftrag von Pulverwerkstoffen im Bauraum von pulverbettbasierten additiven Fertigungsanlagen. a) Rakel, b) Rolle, c) Breitschlitzdüse (VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995), Schutzrecht EP 2818305 A1, Schutzrecht DE 102006055052A1)

2.2.3.1 Beschichtersystem

Das Beschichtersystem stellt für die Monomaterialverarbeitung in pulverbettbasierten Verfahren den Stand der Technik dar. Hier wird mittels einer Rakel

(Schutzrecht DE 102006055052A1), einer Rolle oder einer Breitschlitzdüse (Schutzrecht EP 2818305 A1) das Pulver großflächig über den gesamten Bauraum verteilt (vgl. Abbildung 2-9).

Diese drei Konzepte unterscheiden sich vor allem unter dem Gesichtspunkt der Pulverzuführung. Eine Pulverzuführung von unten unter Nutzung einer Hebeplattform wird meist beim Einsatz der Rolle oder der Rakel eingesetzt. Im Gegensatz hierzu erfolgt bei einer Breitschlitzdüse die Pulverzufuhr von oben (vgl. Abbildung 2-10). Unter dem Aspekt der Multimaterialverarbeitung bietet dieses System große Vorteile, da für jeden Werkstoff eine Pulverzuführung eingesetzt werden kann, und somit kein zusätzlicher Platz in der Baukammer benötigt wird.

Infolge des mittig angebrachten Glättungsschiebers kann im Fertigungsprozess in zwei Richtungen Pulver aus den Pulverkammern aufgebracht und gleichmäßig verteilt werden. Für die Multimaterialverarbeitung ist es möglich, je Belichtungsrichtung eine Pulverkammer mit unterschiedlichen Werkstoffen zu befüllen. Dies ermöglicht eine Multimaterialverarbeitung von zwei Werkstoffen, die abhängig von der jeweiligen Beschichtungsrichtung aufgebracht werden können. Umgesetzt wurde dies von ANDRIANI ET AL. (2014) um 2-D-Multimaterialbauteile aus 316L und C18400 zu fertigen.

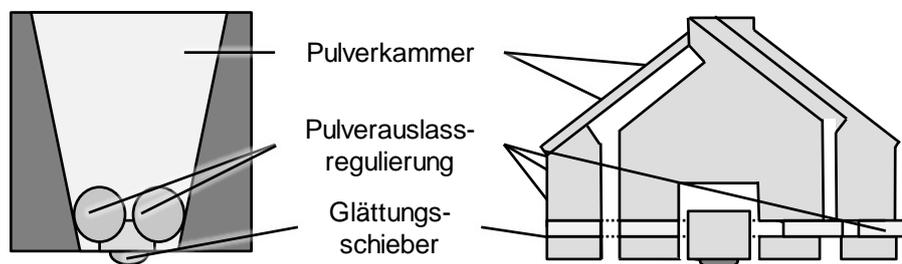


Abbildung 2-10: Aufbau einer Breitschlitzdüse; links nach Schutzrecht EP2191922 A1 und rechts nach Schutzrecht EP 2818305 A1

2.2.3.2 Pulverdüsen

Am verbreitetsten für das Einbringen mehrerer Werkstoffe in den Bauraum von pulverbettbasierten Technologien ist der Einsatz von Düsen mit einem Vorratsbehälter (siehe Abbildung 2-11). Hiermit wird das Pulver in den Bauraum transportiert und anschließend lokal selektiv abgelegt. Das Pulver wird über eine kleine Öffnung aus dem Vorratsbehälter von oben im Bauraum abgelegt. Die Idee des Einsatzes der Düse ist es, Pulver nur an den Stellen abzulegen, an denen es benötigt wird, und somit auf ein nachträgliches Entfernen zu verzichten. Auf dieser Basis

ergibt sich der Prozessablauf, wie er in Abbildung 2-12 gezeigt wird. Zunächst wird ein Pulverwerkstoff mittels einer Düse aufgetragen und mithilfe eines Lasers selektiv verfestigt. Anschließend wird unter Nutzung des Beschichters der zweite

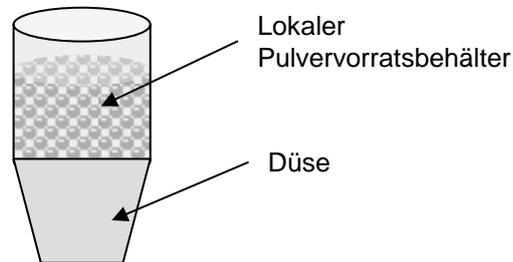


Abbildung 2-11: Aufbau eines düsenbasierten Auftragskonzepts mit lokalem Pulvervorratsbehälter

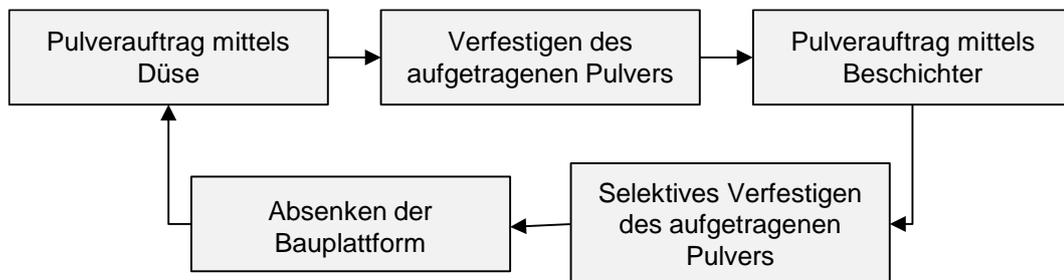


Abbildung 2-12: Prozessablauf zur Fertigung eines Multimaterialbauteils mittels Düse in Anlehnung an OTT (2012)

Werkstoff flächig aufgebracht. Hieran schließt sich wieder das Verschmelzen des Materials an. Somit verbleibt das Pulver im Bauraum, welches als Zweites eingebracht wird. (OTT 2012)

In pulverbettbasierten additiven Technologien werden Düsen bereits eingesetzt (OTT 2012, KOPP ET AL. 2019, KOOPMANN ET AL. 2019, GERSTGASSER ET AL. 2019). Neben einzelnen Düsen können auch Mehrdüsensysteme verwendet werden, sodass größere Flächen in kürzerer Zeit beschichtet werden können.

Eine weitere Möglichkeit zur Integration des Pulverwerkstoffs mittels einer Düse besteht, nachdem der erste Werkstoff mithilfe des Beschichtersystems eingebracht wurde (vgl. Abbildung 2-13). Dieses Konzept wurde von WEI ET AL. (2018) und ZHANG ET AL. (2019) umgesetzt, um so Bauteile aus Edelstahl 316 L, 2.4668 sowie Cu10Sn bzw. 316L und Soda-Lime Glas zu fertigen. Aufgrund der gewählten Rei-

henfolge, den selektiv aufgetragenen Werkstoff als Zweites in den Bauraum einzubringen, ist eine Absaugereinheit notwendig, um Platz für den Werkstoff in der Bauebene zu schaffen.

Hauptvoraussetzung für die Funktionsfähigkeit dieser Methode ist, dass das Pulver durch eine kleine Öffnung mit dem Durchmesser d_0 fließt (siehe Abbildung 2-14). Ist keine hinreichend gute Fließfähigkeit des Pulverwerkstoffs gegeben, verstopft die Düse und der Pulverauftrag ist nicht mehr gewährleistet. Die Fließfähigkeit wird durch Reibungskräfte und Kohäsionskräfte begrenzt (JERRARD ET AL. 2009), welche unter anderem von der Korngrößenverteilung abhängig sind. Beinhaltet der Pulverwerkstoff beispielsweise einen zu großen Feinanteil, d.h. sind zu viele Partikel mit kleinen Durchmessern enthalten, sinkt die Fließfähigkeit. Das Pulver wird kohäsiver und neigt beim Fließen durch Düsen eher dazu diese zu verstopfen (SHABANIAN ET AL. 2012). Diesem Verhalten kann mithilfe von verschiedenen Fluidisierungsprinzipien entgegengewirkt werden. YANG & EVANS (2007) geben einen Überblick über verschiedene Möglichkeiten und kommen zu dem Urteil, dass der Einsatz von akustischen Wellen zur Überbrückung von Kohäsionskräften in Düsen der geeignetste Ansatz ist. Die Funktionsweise einer solchen Düse ist in Abbildung 2-14 dargestellt.

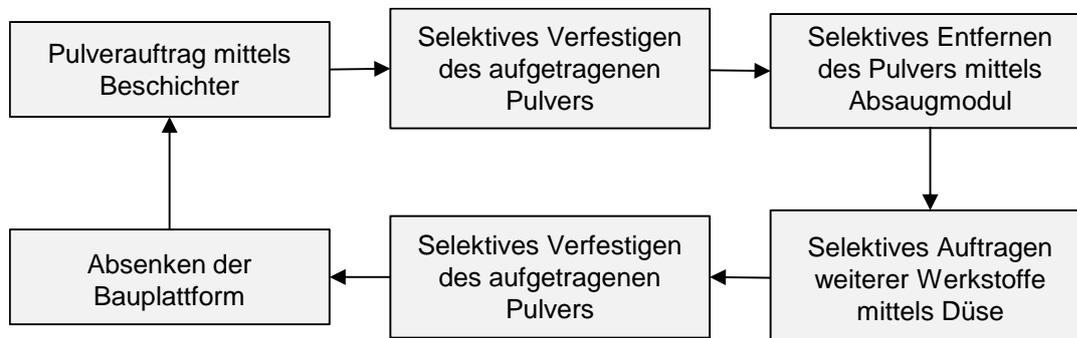


Abbildung 2-13: Prozessablauf zur Fertigung eines Multimaterialbauteils mittels Düse in Anlehnung an WEI ET AL. (2018)

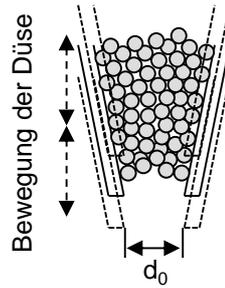


Abbildung 2-14: Grafische Darstellung der Funktionsweise einer mit Vibration in axialer Richtung angeregten Düse zur Pulverablage

Beispielsweise ist es mithilfe eines Piezoaktors möglich, die Düse in Schwingung zu versetzen und hierdurch die entstandenen Brückenbindungen zwischen den Partikeln aufzulösen. Neben genanntem Piezoaktor können auch Ultraschallaktoren oder Sub-woof-Lautsprecher eingesetzt werden (YANG & EVANS 2004, YANG & EVANS 2003, YASHCHUK ET AL. 2002). Um einen Pulverfluss zu gewährleisten, müssen Frequenz und Amplitude des Aktors eingestellt werden (CHEN ET AL. 2012). Um die Pulverablage zu steuern, sind neben der Schwingungseinheit auch die Pulvereigenschaften und die Gestaltung der Düse entscheidend (PEGNA ET AL. 1999). Unter Einsatz dieses Prinzips ist es zusätzlich möglich, den Pulverstrom zu starten und zu stoppen, wodurch eine zusätzliche Regelungseinheit hierfür hinfällig ist (Schutzrecht DE102007029052 A1, YANG & EVANS 2004, CHIANRABUTRA ET AL. 2014).

Neben der Vibration können interpartikuläre Kräfte auch gelöst werden, indem ein gezielter Luftstrom durch das Pulver geleitet wird. Untersuchungen zur Fluidisierung basierend auf diesem Konzept mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern wurden bereits 1973 von Geldart durchgeführt. Allerdings kann anhand dieser Arbeit gesehen werden, dass interpartikuläre Kräfte bei Partikeln mit einem Durchmesser wie sie für das Laserstrahlschmelzen zum Einsatz kommen, nicht mithilfe dieses Konzepts gelöst werden können (GELDART 1973). Eine Fluidisierung mittels Gasströmung findet daher in der additiven Fertigung keinen Einsatz.

Eine weitere Möglichkeit des Pulverdosierens und gezielter der Ablage durch eine Düse wird von (HILLER & LIPSON 2009) gezeigt. Hier werden mithilfe eines Förderrades einzelne Partikel in einen Kanal gefördert, der am Ende mittels eines Schiebers geöffnet und geschlossen werden kann. Auf diese Weise können einzelne Partikel gezielt abgelegt werden. Dieses Konzept wurde bisher allerdings nur mit Partikeln untersucht, deren Durchmesser deutlich über dem liegen, welcher für

das Laserstrahlschmelzen eingesetzt wird. Daher findet auch diese Technik momentan keinen Einsatz, wenngleich dies künftig für Spezialanwendungen vorstellbar ist.

2.2.3.3 Elektrostatik

Ein weiteres Verfahren zur Pulverauftragung, das bereits untersucht worden ist, ist der Pulvertransport mithilfe einer elektrostatisch aufgeladenen Oberfläche (Schutzrecht WO/2004/037469). Hierfür können beispielsweise Fotoleiter eingesetzt werden, auf welche lokal ein elektrisches Potenzial aufgebracht wird (siehe Abbildung 2-15). Das elektrische Potenzial wird mithilfe von Licht in einem bestimmten Wellenlängenbereich in der ladungsgenerierenden Schicht erzeugt und über die ladungstransportierende Schicht an die Oberfläche befördert.

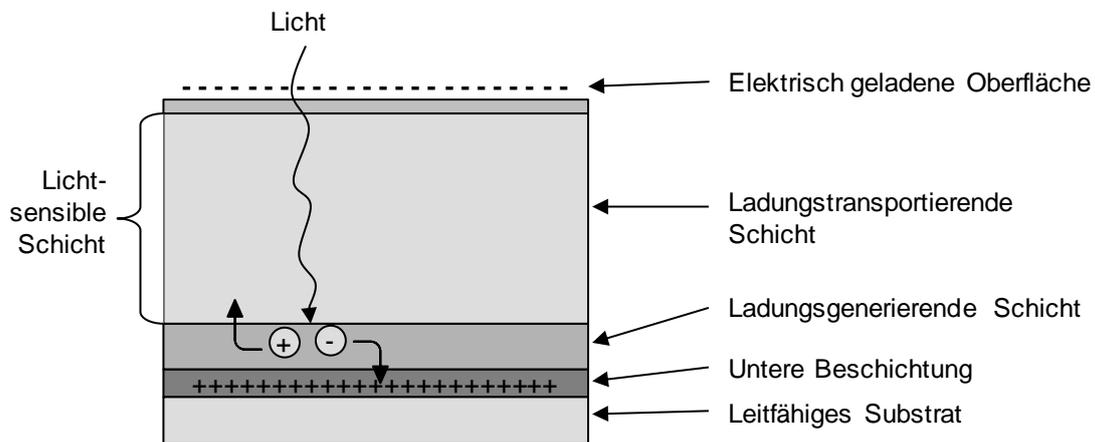


Abbildung 2-15: Beispielhafter Aufbau und Funktionsweise eines Fotoleiters
(DAS 2004)

Unter Ausnutzung der elektrischen Eigenschaften wird an den geladenen Stellen der Werkstoff angezogen und kann so in den Bauraum transportiert und durch Entladung abgelegt werden. Einsatz findet diese Technologie bereits beispielsweise in Kopierern oder Bürolaserdruckern zum Transport und Auftragen der Farbpartikel. Aufbauend auf den Arbeiten von BAKKELUND (1997) und KARLSEN (1998) nutzte VAN DER EIJK ET AL. (2004) dieses Prinzip, um Kupfer- und Eisenpulver zu transportieren und abzulegen, sowie STICHEL ET AL. (2014) und KUMAR ET AL. (2004), um auf diese Weise Schichten aus Polyamid PA12 sowie einem Polystyrolbasierten Werkstoff zu erzeugen. Letztere konnten Bauteile mit einer Höhe von 1 mm fertigen, wobei der Pulverkorndurchmesser durchschnittlich bei 5 μm lag.

Zusätzlich betrachteten KUMAR ET AL. (2003) die Möglichkeit, einen Polymerbinder auf ein Pulverbett aus Aluminiumoxid zu applizieren. Hierbei kam es zum Übertrag der Keramik auf das Bauteil, da bereits abgelegte Partikel aus dem Pulverbett vom Fotoleiter angezogen wurden. Die theoretischen und experimentellen Betrachtungen von STICHEL ET AL. (2014) bestätigen, dass die elektrostatischen Anziehungskräfte ausreichend groß sind, um Partikel aus Polyamid 12 mit einer Korngrößenverteilung, wie sie beim Laserstrahlsintern eingesetzt werden, aufzunehmen und zu transportieren. Es konnte zudem gezeigt werden, dass neben dem elektrischen Potenzial auch der Abstand zwischen Substrat und Transportplatte zu beachten ist. Um Polymere aufzutragen, ist es essenziell, diese mit einem elektrischen Potenzial zu versehen, da sie ansonsten als Nichtleiter nicht vom Fotoleiter angezogen werden würden. Weitere Herausforderungen, die sich bei einem Einsatz eines Fotoleiters ergeben, ist die stetige Entladung, welche bei einer erhöhten Temperatur schneller erfolgt als bei Raumtemperatur (ANSTAETT ET AL. 2016). Auch stellen die nach aktuellem Stand der Technik eingesetzten Ladegitter ein physisches Hemmnis dar, um eine gleichmäßige Pulveranziehung sicherzustellen, da das Pulver nicht in den Schatten der Drähte gelangen kann. Auch treten hierbei starkes elektrisches, parasitisches Transversalfeld auf, wodurch die Pulveranziehung auch negativ beeinflusst wird. KOPP ET AL. (2020) konnte durch den Einsatz eines Laderahmens die Sprühbreite um 90% reduziert und die Homogenität der Pulverschicht um 17% optimieren.

Um auf diese Weise eine Multimaterialschicht zu erzeugen, kann der in Abbildung 2-16 gezeigte Ablauf genutzt werden. Um einen Pulverwerkstoff aufzunehmen, muss der Fotoleiter zunächst selektiv geladen werden, sodass die Bereiche, die Pulver transportieren sollen, ein elektrisches Potenzial aufweisen. Im Anschluss nimmt der Fotoleiter das Material auf und transportiert es in den Bauraum, um es dort gezielt abzulegen. Das applizierte Pulver wird nun verfestigt. Diese Prozessschritte wiederholen sich für den zweiten Werkstoff. Auf diese Weise ist es auch möglich, noch weitere Werkstoffe in den Bauraum zu transportieren und zu verfestigen. Bevor eine neue Schicht begonnen wird, muss sich die Bauplattform um eine Schichtstärke absenken, damit im Verfestigungsschritt der Laserfokus immer auf derselben Ebene liegt. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Pulverwerkstoff immer in der ganzen Schicht aufgebracht wurde, bevor die Bauplatte abgesenkt wird, damit diese beispielsweise die Stützfunktion für die nachfolgenden Überhänge erfüllen kann.

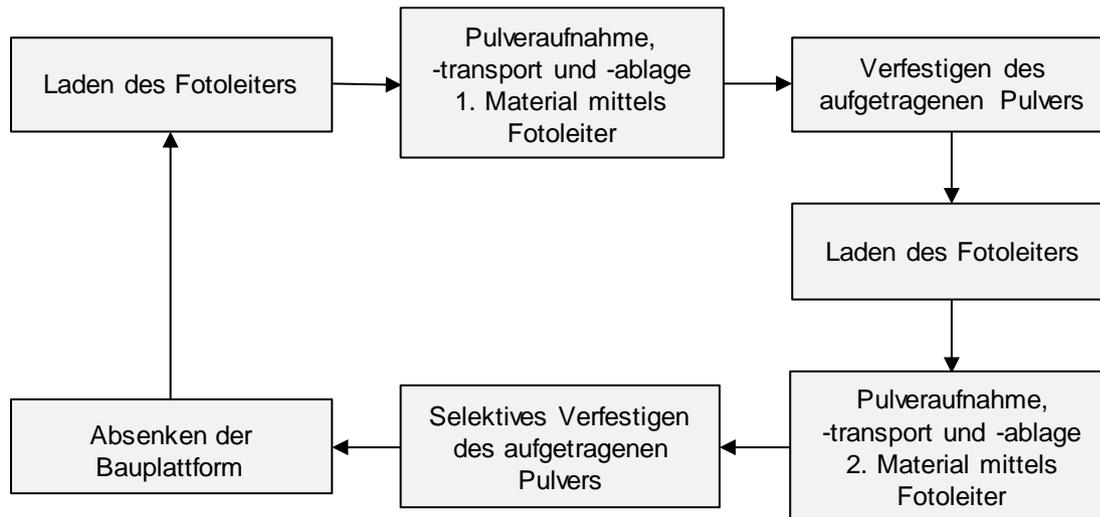


Abbildung 2-16: Multimaterialpulverauftrag mittels Fotoleiter (in Anlehnung an ANSTAETT ET AL. 2016)

Neben dem Pulverauftrag eignet sich dieses Konzept auch um nicht-verfestigtes Pulver aus dem Bauraum wieder zu entfernen. Dies setzte LAPPO ET AL. (2003) als Alternative zu einem vakuumbasierten Ansatz um. Hierbei konnte vor allem ein Einfluss der aufgetragenen Ladung auf die Menge des entfernten Pulvers festgestellt werden. Eine höhere Ladung konnte eine größere Pulvermenge entfernen.

2.3 Multimaterialverarbeitung

2.3.1 Klassifizierung von Multimaterialübergängen

In vielen Branchen werden unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden, um die hohen Anforderungen zu erfüllen, die an Konstruktionen gestellt werden. Hierbei kann zunächst zwischen diskreten und gradierten Werkstoffübergängen unterschieden werden (Abbildung 2-17). Wird von einem diskreten Übergang gesprochen, ist eine Grenze zwischen beiden Werkstoffen erkennbar. Diese Art von Materialverbindungen können mittels konventioneller Fügeverfahren wie Schweißen erzeugt werden. Ein gradiertes Werkstoffübergang zeichnet sich durch einen kontinuierlichen Werkstoffwechsel aus. Es entsteht ein Mischbereich in dem beide Werkstoffe in unterschiedlichen Konzentrationen vorliegen. Das Verhältnis der Konzentrationen ändert sich in Abhängigkeit des Ortes (Abbildung 2-17). Diese stufenweise Änderung der Werkstoffkonzentration muss bewusst erzeugt werden.

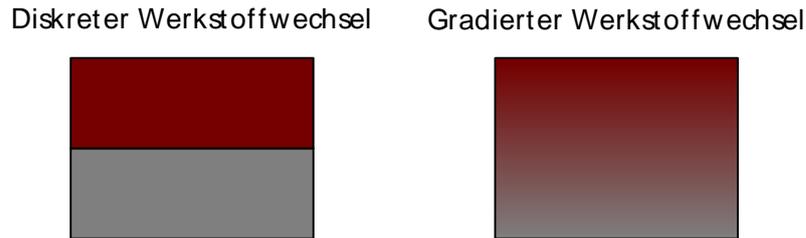


Abbildung 2-17: Schematische Darstellung von Werkstoffübergängen, links diskret und rechts gradiert

Für die Herstellung diskreter Verbindungen zwischen unterschiedlichen metallischen Werkstoffen gibt es nach DIN 8593 insgesamt 51 Fügeverfahren. Beispiele, die unter anderem in der Automobilbranche Einsatz finden, sind Schweißen, Clinchen und Kleben. Mithilfe dieser Verfahren lassen sich unterschiedliche Arten von Materialverbindungen herstellen. Jedoch sind diese unter anderem in der Dicke der Fügepartner, der Anzahl der Schichten und in den Werkstoffen, die verbunden werden können, begrenzt (CHASTEL & PASSEMARD 2014).

Eine Einteilung gradierter Materialübergänge kann nach HASCOT ET AL. (2011) nach dem Grad der Dimension erfolgen. Hierbei wird ein *eindimensionaler Materialübergang* als ein kontinuierlicher Materialwechsel in eine Raumrichtung verstanden. In Bezug auf die additive Fertigung kann dies beispielsweise die Aufbau-richtung sein (Abbildung 2-18 links). Die nächste Stufe an gradierten Übergängen ist ein *2-D-Materialübergang*. Dies entspricht beispielsweise einem Werkstoffwechsel sowohl in z-Richtung als auch in x-Richtung. Das höchste Maß an gradierten Übergängen – ein *3-D-Materialübergang* – wird folglich durch einen Werkstoffwechsel in allen drei Raumrichtungen x, y und z erreicht.

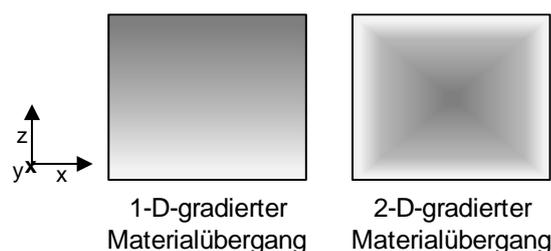


Abbildung 2-18: 1- und 2-D-gradierte Materialübergänge (in Anlehnung an HASCOT ET AL. (2011))

Über dieses Maß hinaus führen HASCOT ET AL. (2011) die Möglichkeit von offenen und geschlossenen Gradienten bei zweidimensionalen Werkstoffwechseln ein. Hierbei wird unter einem geschlossenen Gradienten jener verstanden, der in sich

innerhalb eines Bauteils abgeschlossen ist und nicht bis an die Grenzen des Bauteils reicht. Ein offener Gradient beginnt mit Material A an einer Seite eines Bauteils, verläuft über das gesamte Bauteil und endet mit Material B an den Bauteilgrenzen. Bei 2- und 3-D-gradierten Werkstoffübergängen besteht die Möglichkeit, dass diese nicht gleichmäßig in alle Raumrichtungen erfolgen. Daher wird zwischen Offset- und komplexen Gradienten unterschieden. Hierbei ist ein Offset-Gradient unabhängig von der Raumrichtung. Komplexe Gradienten hängen von der Raumrichtung ab.

TEJASWINI ET AL. (2015) unterscheidet zudem zwischen kontinuierlichen und unterbrochenen gradierten Werkstoffübergängen. Bei einem unterbrochenen sind diskrete Stufen zu erkennen, welche sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung unterscheiden, bei einem kontinuierlichen entsprechend nicht (Abbildung 2-19).

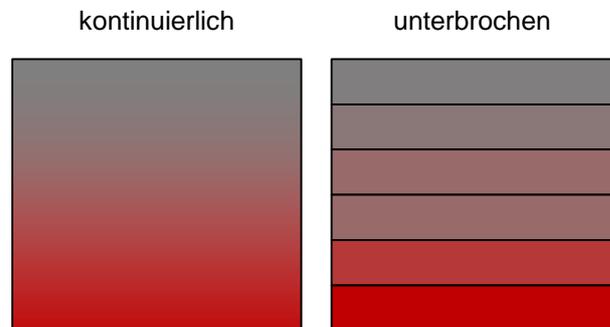


Abbildung 2-19: Grafische Darstellung von links kontinuierlichen und rechts unterbrochenen gradierten Werkstoffübergängen in Anlehnung an (TEJASWINI ET AL. 2015)

Die Fertigung von vollständig gradierten Übergängen mittels additiver Fertigungstechnologien ist aufgrund des schichtweisen Aufbaus nur bedingt möglich. So stellt die Schichtdicke die theoretisch kleinste Diskreditierung in der Materialzuführung dar. Eine Veränderung der Werkstoffzusammensetzung ist nur von einer Schicht zur nächsten möglich. Doch selbst diese Variante kann aktuell aus wirtschaftlicher Sicht nicht für lohnenswert empfunden werden, da der Prozess nach jeder Schicht unterbrochen werden müsste, um eine neue Materialzusammensetzung in den Prozess einführen zu können.

2.3.2 Multimaterialverarbeitung mittels konventioneller Fertigungsverfahren

Um verschiedene Werkstoffe miteinander zu verbinden, existiert eine Vielzahl an Füge-technologien. Einen Überblick über verschiedene Füge-technologien unterteilt in mechanische, thermische und chemische Verfahren gibt MARTINSEN ET AL. (2015) und zeigt gleichzeitig jeweils ihre Vor- und Nachteile auf. Neue Ansätze zur Verbindung verschiedener Werkstoffe mittels Umformen wurden durch GROCHE ET AL. (2014) gezeigt. Auch gibt es bereits Methoden, um geeignete Füge-technologien auszuwählen (PRÜB ET AL. 2010). Alle diese Verfahren fertigen erst jeweils Rohlinge aus den unterschiedlichen Werkstoffen, bevor sie in einem extra Prozess miteinander verbunden werden.

Das Laserstrahlschweißen weist große Ähnlichkeiten mit dem Laserstrahlschmelzen auf, da dieselbe Energiequelle verwendet wird. Dies hat zur Folge, dass physikalische Effekte, welche beim Laserstrahlschweißen auftreten, potenziell auch beim Laserstrahlschmelzen entstehen können. Diese etablierte Technologie wurde bereits umfassend untersucht, weswegen hier schon zahlreiche Effekte und Wechselwirkungen bekannt sind. Daher wird im Folgenden kurz auf das Laserstrahlschweißen mit Fokus auf die Verbindung von unterschiedlichen metallischen Werkstoffen eingegangen.

Beim Laserstrahlschweißen wird bereits heute eine Vielzahl an unterschiedlichen Werkstoffen miteinander verbunden. Beispielhaft seien hier Kupfer und Stahl (MAI & SPOWAGE 2004, CHEN ET AL. 2013) sowie Stahl und Aluminium (SUN & ION 1995, KÜGLER & VOLLERTSEN 2013) genannt.

Einfluss auf die Verbindungsfähigkeit mittels Laserstrahlschweißen von unterschiedlichen Werkstoffen haben, neben der metallurgischen Eigenschaften der gewählten Werkstoffverbindung, vor allem die thermische Leitfähigkeit, die Absorptionsfähigkeit, die Dichte, die spezifische Wärmekapazität, der thermische Ausdehnungskoeffizient und die Schmelztemperatur (SUN & ION 1995). So führt eine hohe thermische Leitfähigkeit dazu, dass die Energie in Form von Wärme schnell abgeführt wird und nur schwer ein Schmelzbad erzeugt werden kann. Weisen zwei Werkstoffe große Unterschiede in diesem Parameter auf, kann dies eine asymmetrischere Schmelzraupe verursachen. Unterschiede in der thermischen Ausdehnung führen zu großen Eigenspannungen zwischen den Fügepartnern, wodurch die Zugfestigkeit und Bruchfestigkeit negativ beeinflusst werden. Als weiterer kritischer

Faktor ist die Schmelztemperatur anzusehen. Vor allem dann, wenn die Siedetemperatur des einen Werkstoffs nahe der Schmelztemperatur des anderen Materials liegt.

Ein Verfahren, mit dem es auch möglich ist, innenliegende Strukturen mittels eines zweiten Werkstoffs herzustellen, ist das Mecobond-Verfahren (Mold Equipment Composite Bond) (Schutzrecht DE10229994C1). Mittels dieses Verfahrens können verschiedene Werkstoffe, die unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen, räumlich miteinander verbunden werden. Um dies zu erreichen, werden die Bauteile erwärmt und mit einem Druck, der größer als ihre Warmstreckgrenze ist, miteinander verbunden. Auf diese Weise findet eine plastische Verformung im Mikrobereich statt. Eingesetzt wird diese Technologie zur Herstellung von Dauerformen für den Metall-, Kunststoff- und Glasguss zur Verbesserung der Wärmeleitungseigenschaften (Schutzrecht DE4439984C1).

Eine weitere Technologie, die sich mit der Herstellung von Multimaterialstrukturen beschäftigt, ist das Gießen. Ein Ansatz ist hierbei das sogenannte Verbundgießen, wobei ein fester Körper des einen Materials mit einem anderen Material umgossen wird. Hierbei entsteht eine Diffusionszone, die eine feste Verbindung zwischen den beiden Werkstoffen gewährleistet. Daher ist bei dieser Technologie der Übergang zwischen beiden Werkstoffen von besonderer Bedeutung. Um mit dieser Technik eine möglichst geschlossene Werkstoffverbindung herzustellen, werden für verschiedene Materialkombinationen unterschiedliche Technologien für die Vorbehandlung der Oberflächen benötigt. Im Falle der Verbindung von Aluminium und Stahl (JIANG ET AL. 2018) sowie bei der Verbindung von Aluminium und Magnesium (ZHANG ET AL. 2014) sind verschiedene Strategien zur Vorbereitung der Oberflächen beschrieben, da insbesondere die Bildung von Aluminiumoxid die Benetzbarkeit erschwert und somit mehr Fehlstellen entstehen können. Auch wurde bei der Verbindung von Kupfer und Aluminium beispielsweise der Einfluss einer Nickelschicht zwischen den beiden Werkstoffen untersucht. Diese soll im Falle dieser Materialverbindung als Diffusionssperre dienen, um die Bildung spröder Phasen wie beispielsweise Al_2Cu zu verhindern (HU ET AL. 2016).

2.3.3 Multimaterialverarbeitung mittels metallbasierter additiver Fertigungsverfahren

Verschiedene Forschungsgruppen haben sich in den letzten Jahren mit der Herstellung von Multimaterialbauteilen mittels additiver Fertigungsverfahren beschäftigt.

All diese Tätigkeiten verbinden unterschiedliche Werkstoffe mithilfe des Laserstrahlschmelzens. Bei genauer Analyse sind jedoch Unterschiede im Verständnis des Begriffs „Multimaterial“ zu beobachten. Alle möglichen Varianten sind in Abbildung 2-20 zu sehen.

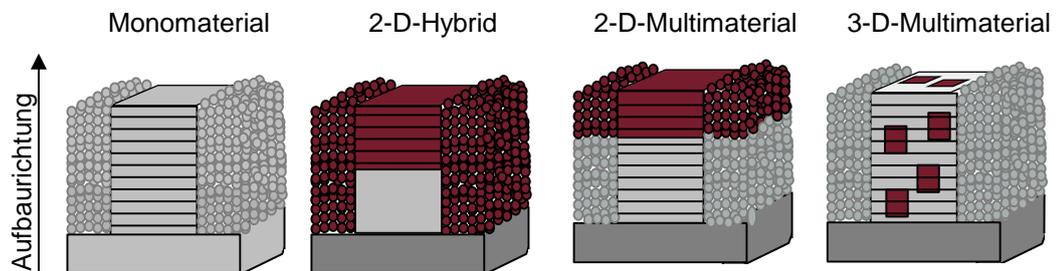


Abbildung 2-20: Arten des Multimaterialeinsatzes mittels Laserstrahlschmelzen im Vergleich zum Monomaterialprozess

Ein Hybridbauteil unterscheidet sich von einem Monomaterialbauteil dadurch, dass auf einen konventionell gefertigten Unterbau ein Bereich mittels additiver Fertigungstechnologien aufgebaut wird. Alle Bereiche tragen zur späteren Funktion des Bauteils bei. Ein Beispiel hierfür liefern FU ET AL. (2016), CYR ET AL. (2018), SHAKERIN ET AL. (2019) oder NGUYEN ET AL. (2019). Die zweite Variante der Multimaterialverarbeitung, die bereits einen Schritt weitergeht, ist die Herstellung von 2-D-Multimaterialbauteilen. Diese zeichnen sich durch wenigstens zwei Teilbereiche aus, welche beide mittels additiver Fertigung erzeugt werden, wobei die verschiedenen Werkstoffe in Aufbaurichtung und unmittelbar aufeinander folgen. Diese Art der Multimaterialverbindung wurde beispielsweise von SING ET AL. (2015) und DEMIR & PREVITALI (2017) angewandt. Die dritte Variante an Multimaterialbauteilen zeichnet sich durch einen beliebigen Wechsel der Werkstoffbereiche sowohl in Aufbaurichtung als auch innerhalb einer Bauschicht aus. Sie werden als 3-D-Multimaterialbauteile bezeichnet. Diese Variante konnte bisher nicht mittels metallverarbeitenden additiven Fertigungstechnologien umgesetzt werden.

Einen umfassenden Überblick über die Multimaterialverarbeitung mittels additiver Fertigungsverfahren geben VAEZI ET AL. (2013). Dieser beinhaltet neben metallverarbeitenden Verfahren auch kunststoffbasierte Fertigungsverfahren. Hier ist es bereits mit unterschiedlichen Verfahren möglich, zwei oder mehr Werkstoffe in einem Bauteil innerhalb eines Fertigungsprozesses herzustellen. Als Beispiel seien hier zum einen CHOI ET AL. (2011) genannt, die dies mittels Stereolithografie umsetzten, zum anderen SUGAVANESWARAN & ARUMAIAKKANNU (2014), die die Polyjet-Technologie für die Realisierung einsetzten.

Erste Erfahrungen bei der Produktion von Multimaterialbauteilen in pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren wurden bereits von OTT (2012) veröffentlicht. Hier wurde mithilfe einer Düse Randschichten aus einer Wolframlegierung um einen Kern aus Werkzeugstahl 1.2709 erzeugt. Die Kombination eines Stahlwerkstoffes und einer Keramik in Form eines 2-D-Multimaterialbauteils zeigte KOOPMANN ET AL. (2019). Zum Auftragen der Pulverwerkstoffe kam hierbei eine Düse zum Einsatz.

Auch die Herstellung von gradierten Werkstoffübergängen mittels additiver Fertigungsverfahren ist unter der Nutzung von Laserauftragsschweißen bereits möglich. MULLER ET AL. (2013) gelang es, funktionale Bauteile mit gradierten Werkstoffübergängen aus einem 316L-Stahl sowie Stellite 6 herzustellen. Die Zuführung der pulverförmigen Ausgangsmaterialien erfolgte über zwei Düsen.

MUMTAZ & HOPKINSON (2007) fertigten ebenfalls Proben mit gradierten Werkstoffübergängen an, nutzten hierfür jedoch den Laserstrahlschmelzprozess. Die verwendeten Werkstoffe waren eine Nickel-Basis-Legierung sowie eine Zirkonium-Keramik. Der gradierte Übergang erfolgte in vier Schritten, wobei zur reinen Nickel-Basis-Legierung zunächst 1 %, dann 5 %, 8 % und schließlich 10 % Zirkonium hinzugefügt wurden. Bei der Analyse der Proben mittels Lasermikroskopie wurden dunkle und helle Bereiche beobachtet. Mithilfe einer EDX-Analyse konnten dunkle Bereiche als Zirkonium-Inseln identifiziert werden. Als Ursache für diese lokalen Ansammlungen des Zirkoniums in der Nickel-Basis-Legierung wurden Buoyancy-Kräfte und Marangoni-Konvektion angeführt.

In Untersuchungen mittels Laser Engineered Net Shaping (LENS, auch als Laser Metall Depositioning, kurz LMD, bekannt), einem Verfahren, welches Pulver durch eine Düse aufträgt und mit einem Laserstrahl direkt verfestigt, wurden 2-D-Multimaterialproben mit diskretem und gradiertem Werkstoffübergang aus 2.4668 und der kupferbasierten Legierung GRCo-84 erstellt. Infolge der großen Unterschiede in den thermischen Eigenschaften war ein direkter Materialwechsel in Form eines diskreten Übergangs nicht möglich. Wurde jedoch eine Zwischenschicht mit einem Mischverhältnis von 1:1 zwischen die beiden reinen Bereiche integriert, war eine Verbindung möglich. Durch die Verbindung der beiden Werkstoffe, konnte eine lokale Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um 300 % verglichen mit reinem 2.4668 erreicht werden (ONUIKE ET AL. 2018).

2.3.4 Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen

Um Multimaterialbauteile nicht nur in Aufbaurichtung, sondern auch innerhalb einer Ebene herstellen zu können, ist es ggf. neben der Anpassung des Auftragskonzepts notwendig, noch ein Modul zur Pulverentfernung zu ergänzen. Hierfür wurden auch schon verschiedene Ansätze untersucht. Mittels eines Saugmoduls ist es möglich, flächig (Schutzrecht EP20090167817) oder lokal Pulver zu entfernen (LIEW ET AL. 2001, LAPPO ET AL. 2003, CHIVEL 2016, Schutzrecht EP20090167817, GLASSCHROEDER ET AL. 2015). Zusätzlich zeigen LIEW ET AL. (2001) die Möglichkeit auf, in einem definierten Bereich Pulver zu Inseln zu verfestigen und diese im Anschluss mechanisch zu entfernen. Eine Kombination aus Saugmodul und mechanischer Pulverentfernung wird bei CHIVEL (2016) eingesetzt. Eine weitere Variante der Pulverentfernung ist der Einsatz des physikalischen Prinzips der Elektrostatik (LAPPO ET AL. 2003). Auf diese Weise kann sowohl flächig als auch lokal Pulver entfernt werden.

Eine letzte Alternative ist der Einsatz von lokal höheren Bauteildichten. Eine höhere Bauteildichte bewirkt eine größere Reduzierung der Pulverschicht. Somit kann eine Differenz in der Höhe der Schichten erreicht werden (LIEW ET AL. 2001). Aufgrund lokal geringerer Bauteildichten muss jedoch auch eine Reduzierung der mechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

Mittels Laserstrahlschmelzen wurden in den letzten Jahren bereits mehrere Werkstoffe kombiniert. Aufgrund des Auftragsmechanismus erfolgte der Materialwechsel hierbei meist in Aufbaurichtung. Es wurden beispielsweise die Werkstoffe 316L und C18400 miteinander kombiniert (LIU ET AL. 2014) oder C18400 auf EN AC-43400 aufgebaut (SING ET AL. 2015).

Auch wurden bereits gradierte Werkstoffübergänge in Aufbaurichtung gefertigt. Da jedoch manuell Pulver nachgefüllt werden musste, wurde die unterbrochene Variante gefertigt. Auf diese Weise konnten zum Beispiel die Werkstoffverbünde aus 316L und 17-4PH (JERRARD ET AL. 2009) oder Waspaloy und Zirkon (MUMTAZ & HOPKINSON 2007) gefertigt werden. Ein automatisiertes System zum Mischen der Pulverwerkstoffe während des Prozesses bevor die Werkstoffe aufgetragen werden, haben DEMIR & PREVITALI (2017) umgesetzt. Auf diese Weise ist es möglich, kontinuierlich gradierte Werkstoffübergänge in Aufbaurichtung zu fertigen. Dies wurde zunächst am Beispiel von reinem Eisen und Al-12Si gezeigt.

Ein vollständig automatisiertes System setzte NADIMPALLI ET AL. (2019) ein, um Bauteile mit einem gradierten Werkstoffübergang aus den Stahlwerkstoffen 316L

und MS1 zu fertigen. Mikroskopische Analysen der Übergangszone sowie Härtemessungen zeigten, dass ein gradierter Werkstoffübergang die Eigenspannungen im Bauteil reduziert.

2.4 Pulverseparierung

Additive Fertigungsverfahren sind dafür bekannt besonders ressourceneffizient zu sein, da das nicht verfestigte Material nach einer kurzen Aufbereitung mittels Sieben wiederverwendet werden kann. Während dieses Aufbereitungsschritts werden Pulverpartikel, die als Folge von Spritzerbildung oder Aneinander-Sintern für einen neuen Prozess zu groß sind, aussortiert. Dieser Arbeitsschritt bleibt auch bei der additiven Multimaterialverarbeitung bestehen. Jedoch kommt ein weiterer Aufbereitungsschritt hinzu: die Trennung der verschiedenen Pulvermaterialien in ihren Ursprungszustand. Dieses Vorgehen wird in der Aufbereitungstechnik als *Sortierung* bezeichnet (KLANERT & CORD-LANDWEHR 2010). Unter Ausnutzung unterschiedlicher physikalischer Materialeigenschaften ist es möglich, einzelne Partikel aus einem Massenstrom zu sortieren. Mögliche Eigenschaften können beispielsweise Dichte, Magnetismus, elektrische Leitfähigkeit, Oberflächeneigenschaften, chemische Eigenschaften oder mechanische Eigenschaften sein (MARTENS & GOLDMANN 2016). Für den Einsatz im Laserstrahlschmelzen bleibt die Sortierung jedoch eine Herausforderung. So kann eine Trennung über unterschiedliche Dichten mithilfe eines Zyklons erfolgen (WEI ET AL. 2016). Die in der Industrie etablierten Verfahren sind momentan jedoch noch auf Partikelgrößen von 2 bis 10 mm limitiert (KLANERT & CORD-LANDWEHR 2010). Im Gegensatz hierzu werden beim Laserstrahlschmelzen Korngrößenverteilung zwischen 20 und 63 μm eingesetzt. Ein anderer Ansatz stammt von CHIVEL (2016). Dieser schlägt vor, unterschiedliche Korngrößenverteilungen zu nutzen, um Pulverwerkstoffe in einem Siebprozess wieder zu separieren. Umgesetzt wurde auch dies noch nicht.

2.5 Fazit

Der Prozess des Laserstrahlschmelzens, als eine Fertigungstechnologie der additiven Verfahren, ist bereits tiefgehend untersucht worden. Größten Einfluss auf die Herstellung in diesem Prozess von Bauteilen haben die Laserleistung und die Belichtungsgeschwindigkeit. Infolge der großen Temperaturgradienten sowie der hierausresultierenden Ausdehnung der erzeugten Schichten entstehen Eigenspannungen im Bauteil, die bis zur Rissbildung führen können. Für die Herstellung von

Monomaterialbauteilen kommt in aktuellen LBM-Anlagen ein Beschichtersystem zum Einsatz. Neben diesem Konzept wurden bereits Pulverdüsen und die Anwendung von Konzepten basierend auf Elektrostatik untersucht, um Bauteile aus mehreren Werkstoffen herzustellen.

Im Umfeld der Industrie und Forschung wird der Begriff Multimaterialbauteil häufig gebraucht. Jedoch wird stets eine andere Ausprägung hierunter verstanden. Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Multimaterial-Bauteil, ein Bauteil, welches in allen Raumachsen eine beliebige Materialverteilung aufweist. Es stellt somit ein 3-D-Multimaterial-Bauteil dar. Der Materialwechsel erfolgt hierbei diskret.

Bauteile, welche aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen, finden bereits heute in der Industrie ihren Einsatz. Konventionell werden diese mittels Füge-technologien, wie dem Laserstrahlschweißen, aus zwei Halbzeugen gefertigt. Ein weiterer Ansatz derartige Bauteile herzustellen, ist das Gießen.

Mittels Laserstrahlschmelzen wurde die Fertigung von Multimaterialbauteilen bislang nicht systematisch untersucht. Der Schwerpunkt der existierenden Arbeiten liegt in der Erzeugung von Hybriden oder 2-D-Multimaterialbauteilen.

3 Werkstoffe und angewendete Methoden

3.1 Werkstoffe

In dieser Arbeit kommen unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz. Diese sind der Werkzeugstahl 1.2709 (chemische Bezeichnung: X3NiCoMoTi18-9-5), die Aluminiumlegierung EN AC-43400 (chemische Bezeichnung: AlSi10Mg), sowie die Kupferlegierung CW106C (chemische Bezeichnung: CuCr1Zr). Alle Werkstoffe wurden bereits im Laserstrahlschmelzprozess verarbeitet. Die Verbindung dieser Werkstoffe ist aus verschiedenen Aspekten relevant. Durch die Verbindung des Stahlwerkstoffes mit der Kupferlegierung können beispielsweise die gute Härteeigenschaften des Stahlwerkstoffes mit den thermischen Eigenschaften der Kupferlegierung ergänzt werden. Hierdurch bleibt beispielsweise bei Spritzgusswerkzeugen der Werkzeugverschleiß gering, während gleichzeitig durch die verbesserten thermischen Eigenschaften die Prozesszeiten reduziert werden können und somit die Stückzahlen erhöht werden können. Die Verbindung von Kupfer und Aluminium ist für zahlreiche Anwendungen in der Elektrotechnik relevant. Hierzu zählen beispielsweise Elektromotoren und Aktuatoren. Auf diese Weise können die guten thermischen und elektrischen Eigenschaften der Kupferlegierung mit den geringeren Werkstoffpreisen des Aluminiums kombiniert werden (CHOPDE ET AL. 2017).

Unter Verwendung der beiden Werkstoffkombinationen können unterschiedliche Aspekte, welche die Verbindung von Werkstoffen beeinflussen können, berücksichtigt werden. Diese können beispielsweise sehr unterschiedliche thermische Materialeigenschaften sein, wie im Beispiel von Stahl und der Kupferlegierung, oder metallurgische Einflüsse, welche insbesondere bei der Verbindung der Aluminiumlegierung mit der Kupferlegierung als kritische Größe in Form von intermetallischen Phasen zu erwarten sind. Es besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der hohen Temperaturgradienten, sowie der Wahl geeigneter Prozessparameter der Einfluss dieser Eigenschaften reduziert werden kann und somit langfristig neuartige Konstruktionen umgesetzt werden können, welche eine Optimierung der Bauteileigenschaften zulässt. Ein Beispiel hierfür sind Bauteile mit integrierten Leitungen oder Sensoren.

Im Folgenden erfolgt ein Auszug zu den aktuellen Tätigkeiten zu der Verarbeitung der einzelnen Werkstoffe.

3.1.1 Werkzeugstahl 1.2709

Der Werkzeugstahl 1.2709 ist ein martensitisch aushärtender Stahl, welcher in der additiven Fertigung weit verbreitet ist. Für den Laserstrahlschmelzprozess wurden bereits umfassende Untersuchungen zu Prozessparametern und dem Einfluss von Wärmenachbehandlungen auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften durchgeführt (MUTUA ET AL. 2018, MENEGHETTI ET AL. 2017, KEMPEN ET AL. 2011a). Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehalts weist dieser Werkstoff eine gute Schweißbarkeit auf, wodurch auch die Verarbeitbarkeit im Laserstrahlschmelzprozess gegeben ist (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Chemische Zusammensetzung von Werkzeugstahl 1.2709 in Prozent (VDI Richtlinie 3405)

C	Ni	Co	Mo	Ti	Mn	P	S	Fe
0,03	18-19	8,5-9,5	4,7-5,2	0,5-0,7	0,1	0,01	0,01	Rest

Die physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise die optischen Eigenschaften mit einer Absorptionsrate von 49.3 % bei einer Wellenlänge von 1064 nm, begünstigen die laserbasierte additive Verarbeitung. Diese und weitere relevante physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs sind in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Für diesen Werkstoff existiert bereits eine VDI-Richtlinie, welche die mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen aufzeigt (siehe Tabelle 3-3). Im Vergleich zu Stangenmaterial fällt auf, dass die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Härte im unbehandelten Zustand, das heißt ohne eine nachgelagerte Wärmenachbehandlung, größere Werte erreicht.

Der Einfluss der Wärmenachbehandlung auf die statischen und dynamischen mechanischen Eigenschaften ist von MENEGHETTI ET AL. (2017) untersucht worden. Sie vergleichen Proben aus dem LBM-Prozess mit Proben vor und nach einer Wärmenachbehandlung sowie Proben, die im Vakuumguss hergestellt worden sind. Im Falle beider additiv aufgebauten Proben konnte für die Zugproben kein Einfluss der Aufbaurichtung festgestellt werden. Die Dauerfestigkeit war bei wärmebehandelten Proben höher als bei unbehandelten. Zudem konnte hier ein Einfluss der Fertigungsrichtung beobachtet werden.

Tabelle 3-2: Physikalische Eigenschaften von Werkzeugstahl 1.2709 (WOLFENSBERGER 2019, DÖRRENBURG EDELSTAHL 2019, OTT 2012)

Physikalische Eigenschaft	Einheit	Wert
Dichte ¹	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	8,02
Spezifische Wärmekapazität ³	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	450
Längenausdehnungskoeffizient ²	10^{-6}	20° C → 200° C: 11,1
	K	20° C → 300° C: 11,2
Wärmeleitfähigkeit ²	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	20° C: 14,3
		350° C: 18,6
		Pulver: 49,3
Absorptionsgrad (Wellenlängenbereich $\lambda_{\text{th}} = 1064\text{nm}$) ¹	%	Verfestigter Werkstoff: 44,9

Weiterführende Untersuchungen zum Einsatz von Werkzeugstahl 1.2709 im Materialverbund mit 17-4PH wurden von JERRARD ET AL. (2009) vorgenommen. Hier konnte ein Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften sowie die Härteeigenschaften des Materialverbundes erst ab einem Anteil von 75 % Werkzeugstahl festgestellt werden. Im Rahmen der Dissertation von OTT (2012) kam der Werkzeugstahl 1.2709 ebenfalls zum Einsatz (vgl. Abschnitt 2).

In den dort beschriebenen Vorarbeiten konnten die in Tabelle 3-4 aufgeführten Parameter für die Verarbeitung im LBM-Prozess identifiziert werden.

In dieser Arbeit wird das Material in Pulverform eingesetzt, welches mittels eines Gasverdüsen hergestellt wurde und somit aus sphärischen Partikeln besteht. Hierbei liegt die Partikelgrößenverteilung zwischen 10 und 45 μm .

*Tabelle 3-3: Mechanische Eigenschaften von im Laserstrahlschmelzprozess
verarbeitetem Werkzeugstahl 1.2709 (VDI Richtlinie 3405)*

Mechanische Eigenschaften	Einheit	Wert				
		Laserstrahlschmelzen			Stangenmaterial	
		unbehandelt	lösungsgeglüht	gehärtet	unbehandelt	gehärtet
E-Modul	GPa	-	-	-	210	-
Streckgrenze $R_{p0,2}$	MPa	810-1080	-	1870-1940	650	1951
Zugfestigkeit R_m	MPa	1030-1190	-	2040-2180	950-110	2183
Bruchdehnung A5	%	4-16	-	3-5	10	10
Härte	HRC	36-38	29-30	54-56	34	57

*Tabelle 3-4: Prozessfenster zur Verarbeitung von Werkzeugstahl 1.2709 mittels
Laserstrahlschmelzen*

	Einheit	MUTUA ET AL. (2018)	OTT (2012)	BRÄUNIG ET AL. (2015)	Hersteller- angaben
Schichtdicke h_h	μm	-	-	30	-
Spurabstand s_a	mm	-	-	0,105	0,120
Laserleistung P_L	W	300	200	187	175
Belichtungsgeschwindigkeit v_s	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	700	200-400	600	550
Volumenenergiedichte V_E	$\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	71,43	-	98,94	88,38

3.1.2 Kupferlegierung CW106C

Bei Kupfer-Chrom-Zirkonium CW106C (CuCr1Zr) handelt es sich um eine Legierung auf Kupfer-Basis. Die exakte Zusammensetzung ist in Tabelle 3-5 angegeben.

Tabelle 3-5: Chemische Zusammensetzung der Kupferlegierung CW106C in Prozent (DEUTSCHES KUPFERINSTITUT 2005)

Cr	Zr	Fe	Si	Sonstiges	Cu
0,5-1,2	0,03-0,3	0,08	0,1	0,2	Rest

Aufgrund der guten Wärmeleitungseigenschaften und dabei hinreichend guter mechanischer Eigenschaften findet dieser Werkstoff im Maschinenbau und der Elektroindustrie seinen Einsatz (BERGMANN 2009) (siehe Tabelle 3-6).

Die Verarbeitung im LBM-Verfahren erfolgte bereits unter anderem von UHLMANN ET AL. (2016) und BECKER (2014). Als besonders herausfordernd stellte sich die hohe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs sowie die niedrige Absorptionsrate der Laserenergie im Wellenlängenbereich von 1064 nm durch das Material heraus. Dies entspricht gerade dem Wellenlängenbereich, der bevorzugt in LBM-Anlagen eingesetzt wird, da die meisten metallischen Werkstoffe dort die eingebrachte Energie gut absorbieren (KRAUSS 2016). Als Folge der hohen Wärmeleitfähigkeit und des gleichzeitig geringen Absorptionsgrades ist eine große Volumenenergie notwendig, um das Material auszuschmelzen.

Bei den Untersuchungen von Pulvergemischen aus Cu, Cu–10Sn und Cu–8.4P wurde von GU & SHEN (2007) eine hohe Neigung zum sogenannten Balling-Effekt beobachtet werden. Hierbei formen sich kleine Kugeln aus dem Schmelzbad, wodurch eine kontinuierliche Schmelzspur verhindert wird (KHAIRALLAH ET AL. 2016). Dieser Effekt tritt insbesondere bei einer zu hohen Volumenenergie auf.

Ein weiteres Phänomen, das bei der Verarbeitung von Kupferlegierungen auftritt, ist die Neigung zur sogenannten Wasserstoffkrankheit (SCHULZE 2010). Diese beschreibt die Reaktion von Wasserstoff mit dem oxidierten Kupfer, wodurch reines Kupfer und Wasser entstehen. Dieser Wasserstoff kann nicht aus dem Gefüge austreten und führt so zu Rissen im Bauteil (SCHULZE 2010, BECKER 2014).

Tabelle 3-6: Physikalische Eigenschaften der Kupferlegierung CW106C (BECKER 2014, DEUTSCHES KUPFERINSTITUT 2005)

Physikalische Eigenschaft	Einheit	Wert
Dichte	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	8,91
Spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	370
Längenausdehnungskoeffizient	$\frac{10^{-6}}{\text{K}}$	20° C → 200° C: 17,0 20° C → 300° C: 17,6
Wärmeleitfähigkeit	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Lösungsgeglüht: 20° C: 170
		20° C: 320
		Wärmeausgehärtet: 200° C: 324 300° C: 333
Absorptionsgrad (Wellenlängenbereich $\lambda_{\text{th}} = 1064\text{nm}$)	%	Pulver (gemessen bei 300K): 37
		Verfestigter Werkstoff (gemessen bei 300K): 5
Schmelzintervall	° C	1070-1080

Im Rahmen von Untersuchungen durch BECKER (2014) sowie von UHLMANN ET AL. (2016), konnten folgende Arbeitspunkte identifiziert werden (siehe Tabelle 3-7). Somit konnte gezeigt werden, dass der Werkstoff im LBM- Prozess verarbeitbar ist.

Zur Versuchsdurchführung kommt in dieser Arbeit ein Pulverpartikel mit einer Korngrößenbereich zwischen 20 und 40 μm zum Einsatz. Die Partikel weisen überwiegend eine sphärische Partikelform auf.

Tabelle 3-7: Von BECKER (2014) und UHLMANN ET AL. (2016) identifizierte Arbeitspunkte zur Verarbeitung der Kupferlegierung CW106C im Laserstrahlschmelzprozess

	Einheit	BECKER (2014)	UHLMANN ET AL. (2016)
Schichtdicke h_h	μm	50	50
Spurabstand s_a	μm	200	80
Laserleistung P_L	W	800	350
Belichtungsgeschwindigkeit v_s	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	400	300
Vorheiztemperatur T_{HV}	$^{\circ}\text{C}$	-	200

3.1.3 Aluminiumlegierung EN AC-43400

Die Aluminiumlegierung EN AC-43400 (Aluminium-Silizium-10-Magnesium, AlSi10MG) ist eine im LBM weitverbreitete Legierung. Dies ist vor allem auf ihre geringe Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit zurückzuführen, was sie für Leichtbauanwendungen prädestiniert (siehe Tabelle 3-9). Die mechanischen Eigenschaften dieser Legierung wurden im Rahmen eines Ringversuchs durch den VDI ermittelt (VDI Richtlinie 3405 Blatt 2). Ihre chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 3-8 zu sehen.

Neben dem VDI haben sich schon zahlreiche weitere Forschungsgruppen mit dieser Legierung und ihrer Verarbeitbarkeit im LBM-Prozess beschäftigt. Tabelle 3-10 zeigt die Prozessparameter, die in den genannten Arbeiten eingesetzt wurden. Beispielsweise untersuchten WEINGARTEN ET AL. (2015) den Einfluss von Wasserstoff im Ausgangsmaterial auf den Fertigungsprozess und die Qualität von gefertigten Bauteilen. Die Untersuchungen zeigten, dass er vor allem in Form von Feuchtigkeit an der Pulveroberfläche vorliegt. Dies führt je nach Prozessparametern zu unterschiedlichen Fehlstellen in Bauteilen. Mithilfe eines primären Belichtens mit sehr geringer Laserleistung konnte ein Trocknungseffekt des Pulvers bewirkt werden, wodurch das Auftreten Wasserstoff-bedingter Fehlstellen um 90 % reduziert werden konnte.

*Tabelle 3-8: Chemische Zusammensetzung von EN AC-43400 in Prozent
(VDI Richtlinie 3405 Blatt 2)*

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
9,0 – 11,0	0,55	0,05	0,45	0,2 – 0,45	0,1
Ti	Ni	Pb	Sn	Al	
0,15	0,05	0,05	0,05	Rest	

Tabelle 3-9: Physikalische Eigenschaften der Aluminiumlegierung EN AC-43400

Physikalische Eigenschaft	Einheit	Wert	
Dichte	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	2,67	
Spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	915 ± 50	
Längenausdehnungskoeffizient	$\frac{10^{-6}}{\text{K}}$	20° C → 100° C:	20
Wärmeleitfähigkeit	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	Wärmenach- behandelt:	20° C: 173
Schmelzintervall	° C	500 – 610	

Tabelle 3-10 zeigt die Prozessparameter, die in den genannten Arbeiten eingesetzt wurden.

Wie bei den zuvor genannten Werkstoffen kommt auch hier ein gasverdüstes Pulver mit überwiegend sphärischen Pulverpartikeln zum Einsatz. Die Durchmesser der Pulverpartikel liegen hierbei zwischen 20 und 63 µm.

3.2 Analysemethoden

Um die Bauteilqualität zu beurteilen, kommen verschiedene Analysemethoden zum Einsatz. Diese sind in Tabelle 3-11 zusammengefasst.

3.2.1 Analyse der relativen Dichte

Die Analyse der relativen Dichte erfolgt auf zwei unterschiedliche Weisen. So wird bei allen Monomaterialproben die Dichte zunächst mittels des archimedischen Prinzips bestimmt. Als Referenz wird die jeweilige Literatur der Werkstoffe genutzt. Zusätzlich wurde bei dieser Art von Bauteilen die Dichte mittels Binarisierung ermittelt. Hierfür wurden die Probekörper zunächst in Aufbaurichtung sowie in der Fertigungsebene getrennt und anschließend geschliffen und poliert.

Tabelle 3-10: Identifizierte Arbeitspunkte zur Verarbeitung von EN AC-43400 im Laserstrahlschmelzprozess (WEINGARTEN ET AL. 2015, THIJS ET AL. 2013)

	Einheit	WEINGARTEN ET AL. (2015)	THIJS ET AL. (2013)
Schichtdicke h_h	μm	50	-
Spurabstand s_a	μm	200	105
Laserleistung P_L	W	910	200
Belichtungsgeschwindigkeit v_s	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	1000-4000	1400
Vorheiztemperatur T_{HV}	$^{\circ}\text{C}$	Keine Vorheizung	Keine Angaben

Tabelle 3-11: Übersicht über eingesetzte Analysemethoden, Vorgehen und Prüfequipment

Analysemethoden	Vorgehen	Prüfequipment
Dichteanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Archimedisches Prinzip • Binarisierung 	Mikroskop
Werkstoffverteilung	Aufnahmen von polierten Schliffen	REM und EDX
Härteanalyse	DIN EN ISO 6507-1	Härteprüfmaschine

Die Aufnahmen wurden mithilfe eines Mikroskops VK-9710 der Firma Keyence angefertigt und ausgewertet. Es wurden mindestens neun Bilder in der Aufbauebene sowie neun Bilder in Aufbaurichtung aufgenommen. Mithilfe von Binarisierung wurde so der Anteil von Fehlstellen im Bild bestimmt. Die relative Dichte des Bauteils ergibt sich als Mittelwert aller Aufnahmen eines Probekörpers (WITS ET AL. 2016, SPIERINGS & LEVY 2009a, VDI 3405 2015).

Zur Analyse der relativen Dichte von Multimaterialbauteilen kann der Wert nur mittels Binarisierung bestimmt werden, da die exakte werkstoffliche Zusammensetzung der verschiedenen Proben nicht exakt bekannt ist. Diese wäre allerdings für eine Bestimmung der Dichte mittels des archimedischen Prinzips notwendig. Für 2-D-Multimaterialbauteile wurden mindestens drei Mikroskopaufnahmen mit einer zehnfachen Vergrößerung in allen Bereichen in der Aufbaurichtung angefertigt. Im Falle der 3-D-Multimaterialbauteile sind Mikroskopaufnahmen mit der gleichen Vergrößerung in der Bauebene und in Aufbaurichtung sowie allen kritischen Bereichen von Material A, Material B und dem Übergangsbereich C entstanden (siehe Abbildung 3-1). Der repräsentative Wert für die gesamte Probe wurde auch bei diesen Proben durch das arithmetische Mittel aller Einzelmessungen bestimmt.

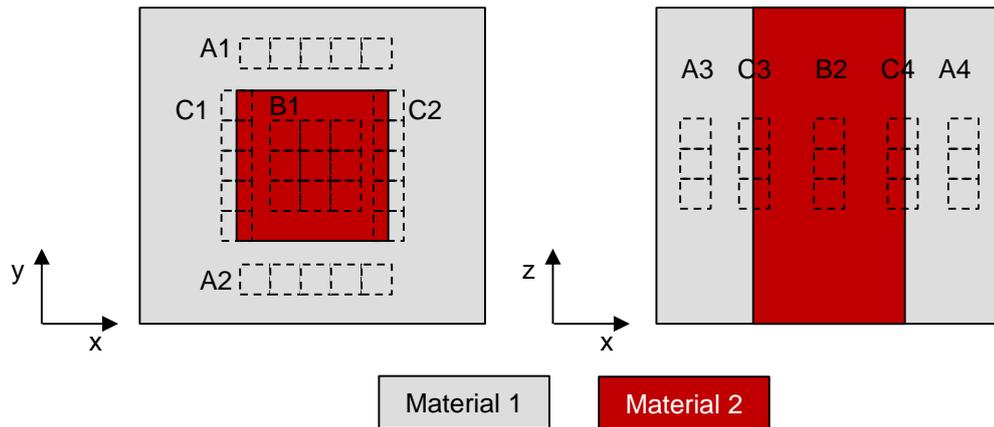


Abbildung 3-1: Bereiche zur Bestimmung der relativen Dichte bei Multimaterialbauteilen. Links in der Bauebene, rechts in Aufbaurichtung

3.2.2 Analyse der Werkstoffverteilung

Die Ermittlung der Werkstoffkonzentrationen erfolgt mittels Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen (REM) und anschließender energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX). Hierfür kommt ein Niedervakuum-REM TM3030Plus Tabletop Microscope von Hitachi sowie das EDX-System Quantax 70 von Bruker zum Einsatz. Anhand der Referenzwerte von Cu und Fe wurde die Werkstoffverteilung in Multimaterialbauteile aus Kupferlegierung CW106C und Werkzeugstahl 1.2709 sowie der Pulverwerkstoffe bestimmt. Diese Elemente wurden gewählt, da sie den größten Anteil der beteiligten Legierungen darstellen und somit die Gesamtverteilung gut repräsentieren. Die Identifikation der Werkstoffverteilung in Bauteilen erfolgte anhand der gefertigten Probekörper.

3.2.3 Härteprüfung

Die Härteprüfung erfolgte an einer Zwick/Roell ZHU 2.5 nach DIN EN ISO 6507-1. Die Prüfung wurde an eingebetteten und geschliffenen Probekörpern durchgeführt. Um die Härte der gesamten Probe zu ermitteln, erfolgte die Messung sowohl in der Bauebene als auch in Aufbaurichtung. Aufgrund des Einsatzes einer Kupferlegierung, bei welcher nur sehr geringe Härtewerte erwartet wurden, erfolgte die Prüfung im Kleinkraftbereich nach Vickers (HV1). Damit der Mindestabstand der Prüfpunkte von mindestens dem Dreifachen der mittleren Eindringdiagonalen einzuhalten war, wurden die Prüfpunkte sowohl in X- als auch in Y- bzw. Z-Richtung versetzt aufgebracht (siehe Abbildung 3-2).

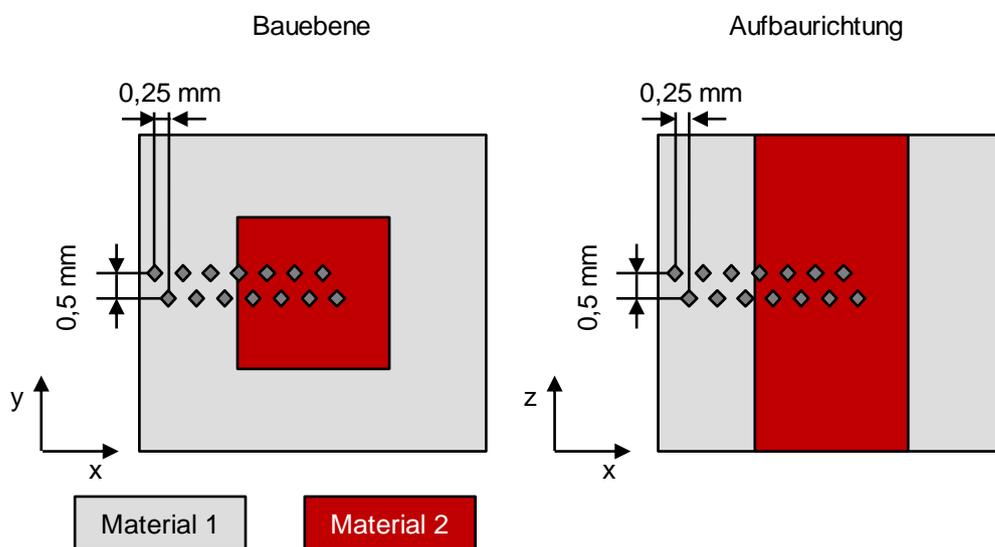


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Prüfpunkte zur Bestimmung des Härteverlaufes

3.3 Fazit

Das vorangegangene Kapitel zeigt die physikalischen, mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften der Werkstoffe Werkzeugstahl 1.2709, Kupferlegierung CW106C sowie der Aluminiumlegierung EN AC-43400. Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik, kann davon ausgegangen werden, dass die Werkstoffe im LBM-Prozess verarbeitet werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit kommen zur Beurteilung der Bauteilqualität verschiedene Analysemethoden zum Einsatz. So wird die Dichte von Bauteilen mittels Archimedischem Prinzip und Binarisierung von Mikroskopiebildern bestimmt. Bei

der Analyse von Multimaterialbauteilen, kommt nur zweit genannte Methode zum Einsatz, da die genaue Materialverteilung nicht bekannt ist. Damit eine ganzheitliche Beurteilung der Materialdichte erfolgen kann, werden in verschiedenen Werkstoffbereichen Aufnahmen angefertigt.

Untersuchungen zur Bestimmung der Werkstoffverteilung werden unter Nutzung von REM-Bilder und Verwendung eines EDX durchgeführt. Hierzu werden Referenzstoffe bestimmt und anhand dieser auf die Verteilung der jeweiligen Legierung im gesamten Bauteil geschlossen.

Mechanische Kennwerte werden mittels Härteprüfung nach Vickers bestimmt. Hierzu werden in definierten Abständen pro Probe mehrere Messpunkte erfasst und auf diese Weise der Verlauf der Härte in den jeweiligen Materialbereichen bestimmt.

4 Auswahl eines Multimaterialauftragsmechanismus

Mit dem Ziel, Multimaterialbauteile aus zwei metallischen Werkstoffen herzustellen, gilt es, sowohl die Anlagentechnik als auch den Prozess weiterzuentwickeln. In Bezug auf das erste Aufgabenfeld stellt der Auftragsmechanismus, der den Pulverwerkstoff in der Prozesskammer verteilt, das Kernelement dar. Für eine LBM-Anlage existieren bereits heute verschiedene Konzepte, um Pulverwerkstoffe zu transportieren und gezielt im Bauraum abzulegen (vgl. Abschnitt 2.2.3). All diese Konzepte haben Vor- und Nachteile, die zum einen durch das Auftragskonzept selbst, zum anderen auch aufgrund des zu fertigenden Bauteils zum Tragen kommen. Bislang ist aber keines in einer Laserstrahlschmelzanlage industriell umgesetzt worden. Ziel dieses Kapitels ist es daher, einen anwendungsnahen Leitfaden zu entwickeln, der die Auswahl eines Auftragskonzepts ermöglicht.

Hierzu wird in Anlehnung an VDI 2221 zunächst die Problemstellung analysiert. Daraus ergibt sich eine allgemeingültige Klassifizierung der Auftragskonzepte. Es schließt sich die Bewertung und Auswahl von potenziellen Lösungen an. Hierzu ist es notwendig, Kriterien zu definieren (siehe Abbildung 4-1).

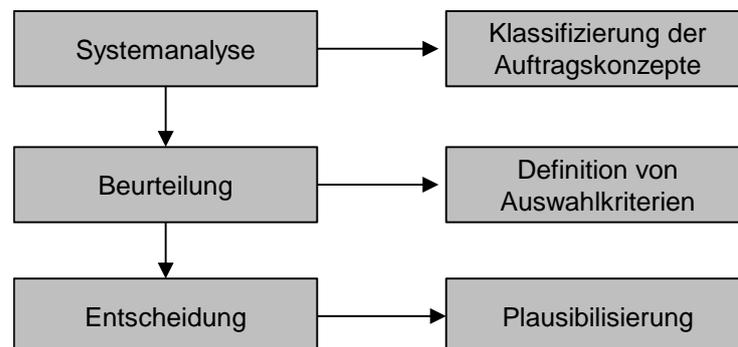


Abbildung 4-1: Vorgehen zur Auswahl eines Auftragskonzepts in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2221

Die zu transportierenden Pulverwerkstoffe entsprechen hierbei den Anforderungen, die durch den eingesetzten Auftragsmechanismus beim Laserstrahlschmelzen an sie gestellt werden. Das heißt, dass die Korngrößen zwischen 20 μm und 63 μm liegen und sie eine sphärische Pulverform aufweisen. Weitere Anforderungen werden durch die Peripherie gestellt. Das Multimaterialauftragskonzept soll in ein bestehendes industrielles Anlagenkonzept integriert werden können.

4.1 Klassifizierung von Auftragskonzepten

Die aufgestellten Rahmenbedingungen können im Zuge einer methodischen Produktentwicklung nach VDI-Richtlinie 2221 als Anforderungen definiert werden. Im nächsten Schritt gilt es, mögliche Lösungen, wie sie beispielsweise in Abschnitt 2.2.3 vorgestellt wurden, zu strukturieren. Abbildung 4-2 zeigt hierzu schematisch eine Klassifizierung in drei Stufen. Diese drei Stufen müssen durchlaufen werden, um systematisch eine Lösung zu finden. In der Abbildung sind die aus dem Stand der Technik bekannten Konzepte zum Pulverauftrag mit aufgeführt (siehe Abschnitt 2.2.3). Im Folgenden werden die drei Stufen näher erläutert.

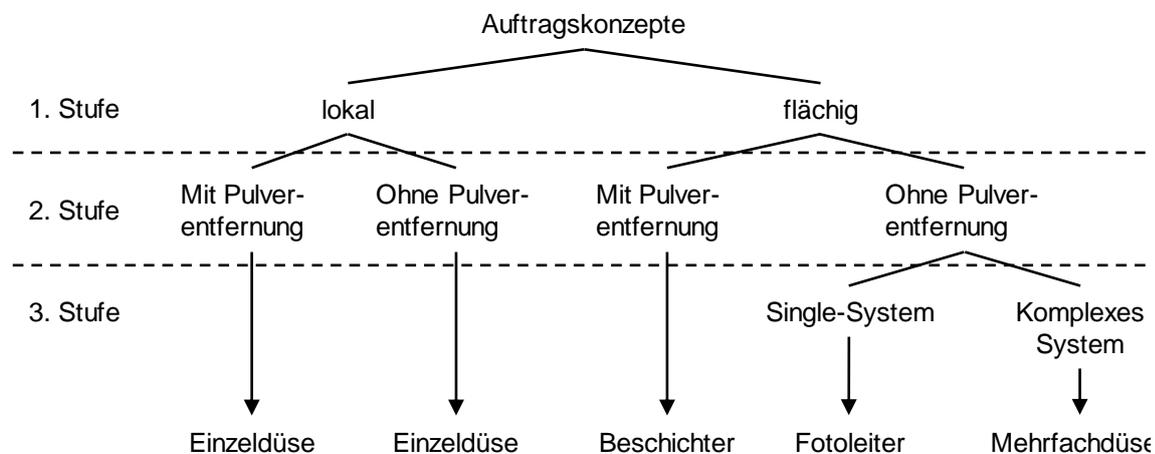


Abbildung 4-2: Klassifizierung von Auftragskonzepten mit einem repräsentativen Beispiel für das jeweilige Konzept (vgl. Abschnitt 2.2.1)

Die erste Einteilung erfolgt auf Grundlage der Größe des Bereichs, der mit einem weiteren Material beschichtet werden kann bzw. soll. Das entsprechende Konzept kann beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Auftragsdauern einen signifikanten Einfluss auf die Aufbaurate und damit auf die Wirtschaftlichkeit eines Konzepts haben.

Im zweiten Schritt wird unterschieden in Konzepte mit bzw. ohne Entfernen des Pulvers aus dem Bauraum. Dies kann aus zwei Gründen notwendig sein. Zum einen können hierdurch Querkontaminationen vermieden werden. Hierunter wird ein ungewollter Pulverübertrag von Material A in den werkstoffspezifischen Bereich von Material B bzw. umgekehrt verstanden. Diese können entweder als Folge der Prozessdynamik in Form von Spritzern, oder aufgrund von Materialanhaftungen des Auftragskonzepts entstehen. Der zweite Grund ist die Erzeugung von Leerstellen im Pulverbett zur Ablage weiterer Werkstoffe im Bauraum. Wird der erste Werkstoff flächig im Bauraum verteilt, können zunächst keine weiteren

4.2 Kriterien und Anforderungen zur Auswahl eines Auftragsmechanismus

Werkstoffe innerhalb dieser Schicht eingebracht werden. Somit muss das nicht verfestigte Pulver entweder aus dem gesamten Bauraum, der aktuellen Pulverschicht oder lokal begrenzt entfernt werden. Anschließend kann erneut Pulver in diesen Bereichen aufgebracht und anschließend verfestigen werden. Neben den positiven Aspekten muss auch erwähnt werden, dass ein Entfernen des Pulvers, aufgrund des zusätzlichen Prozessschritts, zu einer Verlängerung der Bauzeit und damit zu höheren Fertigungskosten führt.

Die letzte Stufe tritt nur bei flächigen Auftragskonzepten ohne Pulverentfernung auf. Hierbei kann in Single-Systeme und komplexe Systeme unterschieden werden. Ein Single-System zeichnet sich dadurch aus, dass jeder werkstoffspezifische Bereich einer Pulverschicht mit einem Auftragssystem aufgebracht wird. Das Aufbringen erfolgt sequenziell. Bei einem komplexen System kommen mehrere gleich- oder verschiedenartige Systeme zum Einsatz. Es werden mehrere Konzepte zur lokalen Pulverablage so kombiniert, dass in einem Verfahrensvorgang ein Werkstoff im gesamten Bauraum abgelegt wird. Hierdurch können unterschiedliche Bereiche in der Bauebene zur selben Zeit beschichtet werden.

4.2 Kriterien und Anforderungen zur Auswahl eines Auftragsmechanismus

Nach der Systemanalyse schließt sich die Bewertung der Systemlösungen an. Hierzu müssen Kriterien definiert werden, anhand derer eine Beurteilung erfolgen kann. Je nach Anwendungsfall, d. h. je nach Bauteil, zur Verfügung stehender Anlage und Gestaltung des Bauprozesses, ist ein anderes Konzept geeignet. Diese lassen sich in den Kategorien Bauteilqualität, technologische Anforderungen und wirtschaftliche Aspekte zusammenfassen. Diese Kategorien werden in den nächsten Abschnitten nacheinander vorgestellt.

4.2.1 Bauteilqualität

Die Bauteilqualität fasst alle Aspekte zusammen, die die Funktionsweise des Bauteils beispielsweise hinsichtlich mechanischer oder thermischer Eigenschaften direkt oder indirekt beeinflussen.

4.2 Kriterien und Anforderungen zur Auswahl eines Auftragsmechanismus

4.2.1.1 Pulverbettqualität

Die Pulverbettqualität beschreibt, wie homogen das Pulverbett im Bauraum aufgetragen ist. Hierbei sollte eine möglichst gleichmäßige Pulververteilung ohne Schwankungen der Höhe der Pulverschicht erreicht werden. Differenzen der Schichtdicke können Veränderungen im Absorptions- und Aufschmelzverhalten des Materials bewirken, was zu Fehlstellen im Bauteil führen kann. Beispiele für solche Fehlstellen können Poren oder nicht aufgeschmolzene Partikel sein. Unter Belastung stellen diese Bereiche mögliche Ausgangspunkte für Risse dar, die zu einem frühzeitigen Versagen des Bauteils führen können.

4.2.1.2 Querkontamination

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Querkontamination der unterschiedlichen Werkstoffe im Bauteil. Diese können zum einen ebenfalls eine Veränderung im Absorptions- und Aufschmelzverhalten des Materials hervorrufen, mit den gleichen Folgen wie gerade aufgeführt. Zum anderen können die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Bauteils beeinflusst werden. Je nach Werkstoffkombination kann es beispielsweise zu einer Reduzierung oder Erhöhung der Festigkeit oder zu einer Versprödung des Werkstoffs kommen.

4.2.1.3 Abbildegenuauigkeit

Ähnlich wie in Aufbaurichtung der Treppenstufeneffekt (vgl. 2.2.1 Abbildung 2-6) infolge der schichtweisen Fertigung auftritt, kann es auch in der Bauebene zu Abweichungen der Ist-Kontur von der Soll-Kontur in Bezug auf die Abbildegenuauigkeit kommen. Zusätzliche Herausforderungen bezüglich der Abbildegenuauigkeit kann es im Zusammenhang mit sehr filigranen Strukturen geben. Beide Fälle hängen mit der Abbildegenuauigkeit des Auftragsmechanismus zusammen. Beispielhaft ist dies in Abbildung 4-3 an einem lokalen Auftragskonzept, einem flächigen komplexen System und einem flächigen Single-System dargestellt. Eine mögliche Folge sind geometrische Abweichungen der gefertigten Struktur von der tatsächlich auftretenden Struktur. Dies kann beispielsweise zu Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften oder der Masse des Bauteils führen. Als Konsequenz können weitere Komponenten einer Baugruppe falsch ausgelegt sein, was ein verfrühtes Bauteilversagen hervorrufen kann.

4.2 Kriterien und Anforderungen zur Auswahl eines Auftragsmechanismus

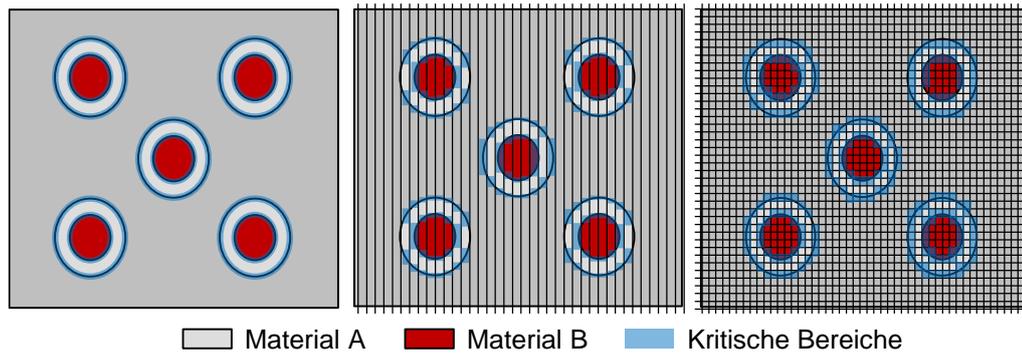


Abbildung 4-3: Darstellung von Konturabweichungen bei (links) einem lokalen Auftragskonzept, (mittig) einem flächigen komplexen System sowie (rechts) einem flächigen Single-System

4.2.2 Technologische Anforderungen

Die zweite Kategorie sind die technologischen Anforderungen. Für den Einsatz einiger Konzepte müssen die Werkstoffe oder die zu verarbeitenden Pulver gewisse Randbedingungen erfüllen, um genutzt werden zu können. Diese Aspekte werden unter diesem Kriterium zusammengefasst.

4.2.2.1 Pulvereigenschaften

Dieser Punkt schließt alle Eigenschaften ein, die ein Werkstoff in Pulverform hat. Dies umfasst beispielsweise die Korngrößenverteilung und die Partikelform sowie sich hieraus ergebende Eigenschaften, wie die Fließfähigkeit und den Schüttwinkel.

4.2.2.2 Werkstoffeigenschaften

Die Werkstoffeigenschaften beschreiben alle Eigenschaften, die unabhängig von der äußeren Form des Stoffs existieren. Dies können beispielsweise elektrische, oder magnetische Eigenschaften sein.

4.2.3 Wirtschaftliche Aspekte

Die unter dem Schlagwort „wirtschaftliche Aspekte“ genannten Punkte haben Auswirkungen auf die entstehenden Fertigungskosten.

4.2.3.1 Auftragsdauer

Ein für die Wirtschaftlichkeit eines additiven Fertigungsverfahrens wichtiges Merkmal ist die Fertigungsdauer, also die Zeitspanne, die benötigt wird, um das Bauteil herzustellen. Abhängig von Bauteil und Bauprozessgestaltung kann diese stark vom Auftragskonzept beeinflusst werden. Die Faktoren, die diese Zeit bestimmen, sind die Verfahrzeit des Beschichtungsmechanismus und die Dauer für zusätzliche Absaugprozesse. Wobei die Verfahrzeit die Dauer ist, in der sich das Auftragsmodul bewegt.

4.2.3.2 Pulverdurchmischung

Ein weiterer Faktor, der sich auf die Fertigungskosten auswirken kann, sind die Aufwendungen für den Pulverwerkstoff. Im Monomaterialprozess ist es möglich, das nicht verwendete Material nach einer Aufbereitung mittels Sieben sowie einer Zugabe von Neupulver, zur Kompensation des Downgrading, wiederzuverwenden. Somit entstehen vor allem Kosten für das im Fertigungsprozess real verbrauchte Material. Im Gegensatz hierzu besteht im Multimaterialprozess die Möglichkeit, dass sich die Pulverwerkstoffe durchmischen. Diese können dann abhängig vom Einsatzgebiet kein weiteres Mal verwendet werden. Eine aus wirtschaftlicher Sicht bessere Alternative ist es, wenn die Pulver in einem weiteren Prozessschritt wieder getrennt werden können. Hierdurch besteht die Möglichkeit, diese Werkstoffe wiederzuverwenden.

4.3 Auswahl eines Auftragskonzepts

Um ein geeignetes Auftragskonzept auszuwählen, müssen die Anforderungen des Bauteils und der Bauprozessgestaltung mit den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Konzepte abgewogen werden. Hierfür stellt die in Tabelle 4-1 gezeigte Checkliste eine Hilfestellung dar, die die Kriterien zur Auswahl eines Konzepts den verschiedenen Arten von Auftragskonzepten gegenüberstellt. Dies ermöglicht es, alle Eckdaten übersichtlich aufzubereiten und auf deren Basis eine Entscheidung zu treffen. Hierbei sind die Kriterien *Querkontamination* und *Pulverdurchmischung* bereits durch den Auftragsmechanismus bestimmt. Alle weiteren Faktoren ergeben sich durch das Bauteil und durch die zu verarbeitenden Werkstoffe. Der Aspekt der *Auftragsdauer* hängt zusätzlich noch von der Gestaltung jedes einzelnen Bauvorhabens ab. Das heißt beispielsweise, wie viele Bauteile in einem Bauprozess gefertigt werden oder wie diese positioniert sind.

Tabelle 4-1: Checkliste zur Auswahl eines Auftragskonzepts

	Anforderungen	Lokal		Flächig	
		mit Absaugung	ohne Absaugung	mit Absaugung	ohne Absaugung
		mit Absaugung	ohne Absaugung	komplexe Systeme	Single-Systeme
Bauteil-eigenschaften	Pulverbett-qualität	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	Querkontamination	minimal	ja	nein	minimal
	Abbildgenauigkeit	sehr hoch	min. d_s	min. d_F	k. A.
Technologische Anforderungen	Pulver-eigenschaften	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	Werkstoff-eigenschaften	elektr. /mag. Eigenschaften/ etc.	elektr. /mag. Eigenschaften/ etc.	elektr. /mag. Eigenschaften/ etc.	elektr. /mag. Eigenschaften/ etc.
Wirtschaftliche Aspekte	Auftragsdauer	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	Pulverdurchmischung	nein	nein	ja	nein
Gesamtbetrachtung					

Um zu einem Ergebnis zu kommen, können Punkte vergeben werden, welche die Eignung des Konzepts widerspiegeln. Hierbei weist eine geringe Punktzahl eine sehr gute Eignung oder einen sehr hohen Erfüllungsgrad an die Anforderungen aus. Eine hohe Punktzahl entspricht einem geringen Erfüllungsgrad. Die Anforderungen müssen vom Anwender definiert werden, da diese vom Anwendungsfall abhängig sein können.

4.4 Plausibilisierung anhand eines Beispiels

Die gerade erläuterte Checkliste wird im Folgenden anhand eines Beispiels näher erläutert. Hierbei sollen mögliche Auswirkungen von unterschiedlichen Konzepten auf die einzelnen Kriterien aufgezeigt werden.

4.4.1 Randbedingungen

Bei dem zu betrachtenden Bauteil handelt es sich um einen Angussstutzen, der eine Komponente eines Spritzgusswerkzeugs zur Herstellung von Flaschenverschlüssen darstellt. Es ist ein zylindrisches Bauteil mit einem Außendurchmesser von 48 mm und einer Höhe von insgesamt 30 mm, wobei die oberen 10 mm im additiven Fertigungsprozess in Multimaterialbauweise hergestellt werden sollen (siehe Abbildung 4-4).

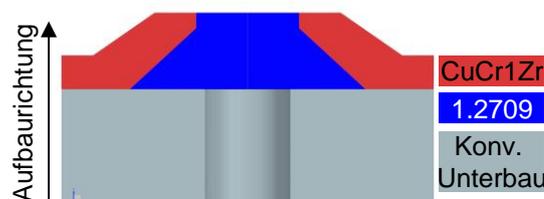


Abbildung 4-4: Referenzbauteil zur Auswahl eines geeigneten Auftragsmechanismus

Das Bauteil soll aus der Kupferlegierung CW106C und dem Werkzeugstahl 1.2709 hybrid auf einem konventionell gefertigten Unterbau gefertigt werden. Diese Materialkombination wurde gewählt, um eine Verbesserung der Wärmeabfuhr im Werkzeug zu bewirken. Hierdurch kann die Zyklusdauer reduziert werden, was zu einer optimierten Produktivität führt. Gleichzeitig bleiben durch den Einsatz des Werkzeugstahls die mechanischen Eigenschaften – insbesondere die Abriebfestigkeit an den hochbelasteten Bereichen – erhalten, sodass keine Minderung der Standzeiten des Werkzeugs zu erwarten ist.

Zur Auswahl stehen vier verschiedene Konzepte aus dem aktuellen Stand der Technik, welche jeweils eine Kategorie repräsentieren.

4.4.2 Lokaler Auftragsmechanismus ohne Absaugung

Der erste Werkstoff wird mithilfe einer Düse lokal aufgebracht. Der Pulverauftrag und das Verfestigen erfolgen sequenziell für jedes Material, um Materialübertragungen zu vermeiden. Für den zweiten Pulverwerkstoff wird ein flächiges Konzept eingesetzt, um den Bauraum mit Pulver aufzufüllen (siehe Abbildung 2-13). Dieses Konzept wurde bereits von OTT (2012) umgesetzt.

4.4.3 Lokaler Auftragsmechanismus mit Absaugung

Diese Option benötigt einen lokalen Absaugprozess, da hier zunächst eine ganze Pulverschicht flächig aufgebracht und selektiv verfestigt wird. In einem folgenden Prozessschritt wird nun Pulver dort entfernt, wo ein anderer Werkstoff im Bauteil vorkommen soll. Die so entstandenen Fehlstellen werden anschließend lokal wieder aufgefüllt und verfestigt (siehe Abbildung 2-13). Als Beispiele für dieses Konzept können LAPPO ET AL. (2003), LIEW ET AL. (2001) sowie WEI ET AL. (2018) genannt werden.

4.4.4 Flächiger Auftragsmechanismus mit Absaugung

Das nächste Auftragskonzept zeichnet sich dadurch aus, dass jeder Werkstoff über die gesamte Fläche im Bauraum mit einem Beschichter aufgebracht, selektiv verfestigt und loses Pulver wieder entfernt wird. Es wird lediglich das Pulver aus der aktuellen Pulverschicht entfernt. Auf diese Weise bleibt Pulver im Bauraum und kann die Wärmeabfuhr sowie eine Stützfunktion übernehmen. Um Pulververmischungen zu vermeiden, sollte dieses Material für den gesamten Bauprozess konstant bleiben. Die Abfolge der einzelnen Prozessschritte im Multimaterialprozess ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Dieses Konzept wurde beispielsweise von CHIVEL (2016) und ANSTAETT ET AL. (2017) umgesetzt.

4.4.4.1 Flächiger Auftragsmechanismus ohne Absaugung

Der Prozessablauf für einen flächigen Auftragsmechanismus ohne Absaugung ist beispielhaft in Abbildung 2-17 zu sehen. Im Falle eines Monosystems kommt nach

dem Vorbild von VAN DER EIJK ET AL. (2004) ein Fotoleiter zum Einsatz, welcher selektiv aufgeladen wird und das Material somit selektiv aufnimmt und ablegt.

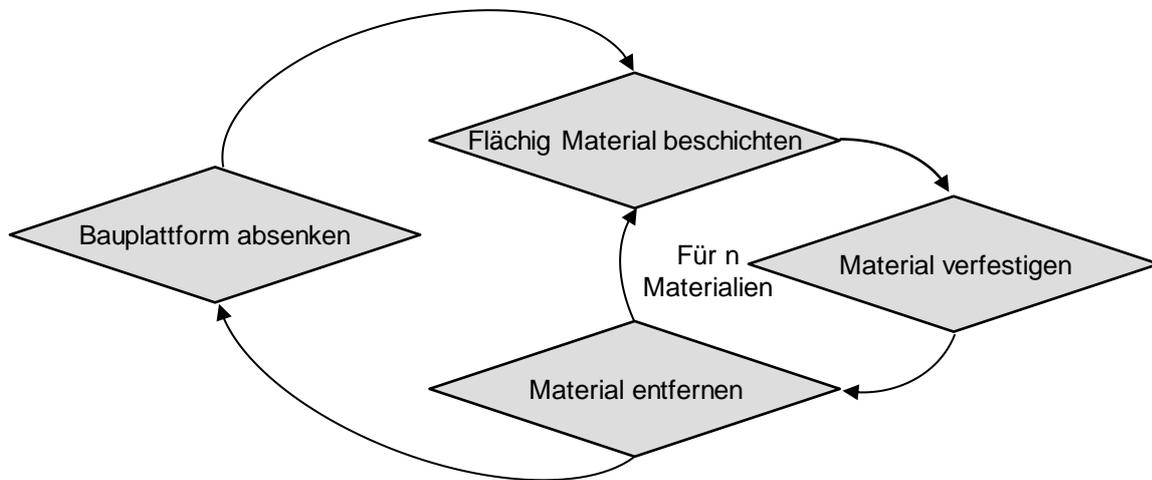


Abbildung 4-5: Prozessablauf für einen flächigen Auftragsmechanismus mit Absaugung

4.4.5 Beurteilung der Bauteilqualität

4.4.5.1 Pulverbettqualität

Ziel des Schichtauftrags ist eine homogene Pulverschicht. Beim Einsatz von lokalen Auftragskonzepten oder des Multisystems kann es zu Unebenheiten der Pulverschicht kommen. Diese können zwischen bereits verfestigtem Bauteil und dem eingebrachten Pulver auftreten. Bei größeren Bereichen besteht zusätzlich die Gefahr, dass infolge des Schüttwinkels Unebenheiten im Pulverbettbereich zwischen den einzelnen Pulverbahnen entstehen (siehe Abbildung 4-6, rechts). Da dies unter anderem zu Höhenunterschieden im Bauteil führt, werden für beide Düsen-Konzepte zwei Punkte vergeben.

Bei Verwendung eines Fotoleiters können ebenfalls Inhomogenitäten auftreten. Da in diesem Konzept keine Verdichtung des Pulverbetts durch eine Rolle oder Vergleichbares vorgesehen ist, ist bei diesem Konzept eine geringe Pulverbettichte zu erwarten. Während beim Beschichter-Konzept kleinere Partikel Zwischenräume zwischen größeren Partikeln auffüllen, wird dies bei einem losen Auftragen

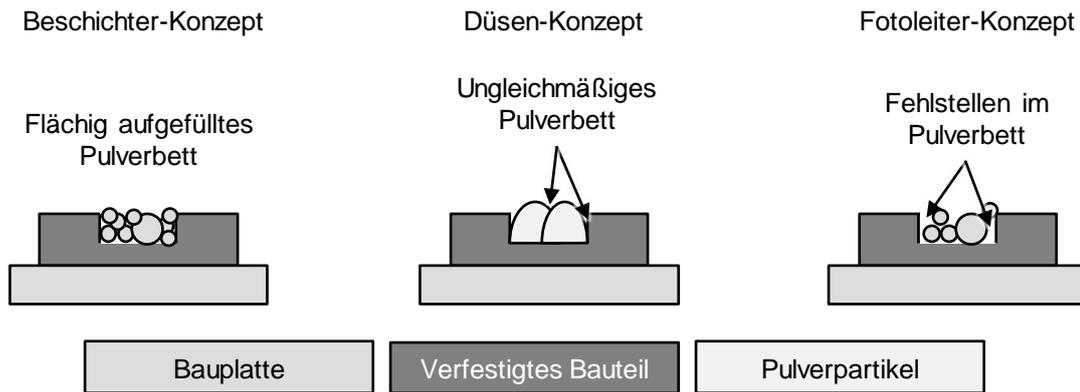


Abbildung 4-6: Homogenität des Pulverbetts bei Verwendung eines lokalen und eines flächigen Pulverauftrags

von oben, ohne das Einwirken einer zusätzlichen Kraft zum Verdichten der Pulverschicht, nicht erreicht. Somit wird dieses Konzept auch mit zwei Punkten bewertet.

Bei Verwendung des Beschichter-Konzepts treten diese Inhomogenitäten, wie sie beim Auftrag mit einem Düsen-Konzept erfolgen, nicht auf. Der Pulverauftrag mittels eines Beschichters, bewirkt gleichzeitig eine Verdichtung des Pulverbetts, sodass eine höhere Pulverbettdichte zu erwarten ist. Daher erhält dieses Konzept einen Punkt.

4.4.5.2 Querkontamination

Für Querkontaminationen gibt es mehrere Ursachen. Nicht mitbetrachtet werden Fehlfunktionen der Auftragskonzepte, wie kein ausreichender Pulverauftrag bei Düsen-Konzepten oder eine Fehlfunktion des Absaugmoduls.

Vermehrt Querkontaminationen können bei einem Düsen-Konzept ohne Absaugung auftreten. Hier können sich nach Verfestigung des ersten Werkstoffs Pulverpartikel des zweiten Werkstoffs in die Räume zwischen den einzelnen Pulverbahnen ablegen. In der Folgeschicht werden diese Partikel mit aufgeschmolzen und verursachen somit eine ungewollte Vermischung der Werkstoffe. Daher wird dieses Konzept mit zwei Punkten bewertet.

Bei den beiden Konzepten mit Absaugung können die gerade genannten Pulverübertragungen im Absaugprozess entfernt werden. Daher erhalten diese einen Punkt.

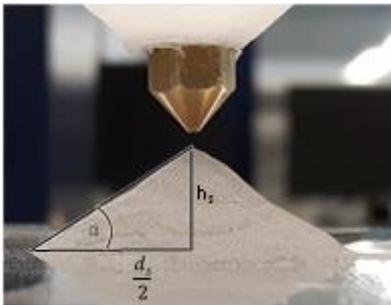
Das Fotoleiter-Konzept trägt das Pulvermaterial direkt nur dort auf, wo es benötigt wird. Somit können keine Querkontaminationen entstehen. Daher wird dieses Konzept auch mit einem Punkt bewertet.

4.4.5.3 Abbildegenuigkeit

Unterschiede treten in der Abbildegenuigkeit auf. Bei Verwendung des Fotoleiters liegt die auch für Papierdrucker übliche Auflösung bei 300 oder 600 dpi. Dies stellt bereits eine hohe Auflösung der Abbildegenuigkeit dar. Bei einem Fokusbereich von 100 μm können so kleine Strukturen nicht erzeugt werden. Da in diesem Fall der limitierende Faktor der Fokusbereich ist, wird dieses Konzept mit einem Punkt bewertet.

Das Beschichter-Konzept ist ebenfalls nur durch den Fokusbereich begrenzt. Daher erhält dieses auch einen Punkt.

Bei den beiden Düsen-Konzepten müssen der Schüttwinkel α und die Spurbhöhe h_s berücksichtigt werden, um die kleinste herstellbare Struktur bestimmen zu können (siehe Abbildung 4-7). Diese beiden Werte bestimmen die minimale Spurbbreite (siehe Formeln (4-1) und (4-2)).



$$\tan \alpha = \frac{h_s}{\frac{d_s}{2}} \quad (4-1)$$

$$d_s = \frac{2 \cdot h_s}{\tan \alpha} \quad (4-2)$$

Abbildung 4-7: Zusammenhang des Schüttwinkels α , Spurbhöhe h_s und Spurbbreite d_s

So hat beispielsweise das in dieser Arbeit verwendete Stahlpulver einen Schüttwinkel von ca. 33° . Bei einer Spurbhöhe von $30 \mu\text{m}$ kann somit eine minimale Spurbbreite von $92,39 \mu\text{m}$ erreicht werden. Feinere Strukturen können nicht dargestellt werden. Breitere Spuren können nur als vielfaches dieser Spurbbreite unter Berücksichtigung eines Spurüberlapps abgebildet werden. Dies limitiert die Abbildegenuigkeit, weswegen die beiden Düsen-Konzepte mit zwei Punkten bewertet.

4.4.6 Beurteilung der technologischen Anforderungen

Die technologischen Anforderungen umfassen die Pulvereigenschaften und die Werkstoffeigenschaften.

4.4.6.1 Pulvereigenschaften

Um den Auftrag mittels Düse oder Beschichter realisieren zu können, muss die Fließfähigkeit der Pulverwerkstoffe gegeben sein. Diese ist für das Beschichter-Konzept sowohl für das eingesetzte Pulver des Werkzeugstahl als auch der Kupferlegierung gegeben. Daher kann diese als gut beurteilt werden. Das Konzept erhält einen Punkt.

Wird ein Düsen-Konzept mit kleiner Düsenöffnung verwendet, um einen zusätzlichen Öffnungsmechanismus zu vermeiden, muss ein Fluidisierungsprinzip vorgesehen werden, um den Pulverfluss durch die Düse sicherzustellen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Daher wird dieses Konzept mit zwei Punkten bewertet.

Die Pulvereigenschaften beeinflussen den Absaugprozess nicht. Somit wird die Erzeugung der Multimaterialschicht nicht beeinflusst, wodurch dieser Vorgang bei keinem Konzept berücksichtigt werden muss.

Für den Pulverauftrag mittels eines Fotoleiters sind momentan keine Anforderungen an die Pulvereigenschaften bekannt. Da das Fotoleiter-Konzept das Material unter Verwendung eines Hilfsmittels bewegt, werden hier auch keine Einschränkungen erwartet. Daher wird dieses Konzept auch mit einem Punkt bewertet.

4.4.6.2 Werkstoffeigenschaften

Unter Verwendung eines Beschichter-Konzepts oder von einzelnen oder mehreren Düsen werden keine Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften gestellt. Daher erhalten diese Konzepte je einen Punkt.

Da bereits eine Vielzahl an Werkstoffen mittels eines Fotoleiters aufgetragen wurden, können beispielsweise unter Einsatz von Hilfsmitteln die notwendigen Eigenschaften des Pulverwerkstoffes eingestellt werden. (VAN DER EIJK ET AL. 2004, STICHEL ET AL. 2014, DAS 2004, KUMAR ET AL. 2004). Hiermit ist ein Mehraufwand in der Vorbereitung verbunden, womit dieses Konzept mit zwei Punkt bewertet wird.

4.4.7 Beurteilung der wirtschaftlichen Aspekte

4.4.7.1 Auftragsdauer

Die Auftragsdauer hängt vor allem von der Ablegegeschwindigkeit des jeweiligen Konzepts ab. Dies ist die Geschwindigkeit, mit der das Auftragsmodul während des Ablegens des Pulverwerkstoffs bewegt werden kann. In Verbindung mit Formel (4-3) kann die Beschichtungsdauer für den gesamten Bauprozess bestimmt werden.

Bei langen Beschichtungszeiten reduziert sich die Aufbaurate, wodurch sehr lange Aufbaudauern entstehen. Die jeweiligen Auftragszeiten für lokale (t_{lokal}) und flächige ($t_{\text{flächig}}$) Auftragskonzepte in einer Schicht ergeben sich aus der Summe der Dauern für die einzelnen Prozessschritte des Auftragens und ggf. Entfernens der jeweiligen Werkstoffe. Diese lassen sich wiederum mithilfe der jeweiligen Verfahrensgeschwindigkeit zum Auftragen (v_{auf}), zum Anfahren von Positionen (v_v) und Entfernen (v_{ent}) sowie den dazugehörigen Strecken (s_{auf} , s_v , s_{ent}) bestimmen. Aufgrund der lokalen Begrenzung des Auftrags kann es bei lokalen Auftragskonzepten zusätzlich notwendig sein, dass die Flächen von Material A mehrfach abgefahren werden müssen, da die realen Spurbreiten zum Entfernen (d_{ent}) und Auftragen (d_{sp}) sowie Spurhöhen (h_{auf} , h_{ent}) von den notwendigen Schichthöhen (h_s) abweichen. Um die gesamte Dauer für den Pulverauftrag eines Bauteils zu bestimmen, muss die Dauer für die einzelnen Schichten mit der gesamten Anzahl an Schichten multipliziert werden. Diese lässt sich aus der Bauteilhöhe (h_B) und der Schichthöhe (h_s) berechnen (siehe Formeln (4-3) und (4-4)). Werden beide Konzepte miteinander kombiniert, müssen die jeweiligen Auftragsdauern zu einer Gesamtauftragsdauer t_{ges} addiert werden (siehe Formel (4-5)).

$$t_{\text{lokal}} = \sum_{i=1}^n \left(v_{v,i} \cdot s_{v,i} + v_{\text{ent},i} \cdot \frac{A_i}{d_{\text{ent},i}} \cdot \frac{h_{\text{ent},i}}{h_s} + v_{\text{auf},i} \cdot \frac{A_i}{d_{\text{sp},i}} \cdot \frac{h_{\text{auf}}}{h_s} \right) \cdot \frac{h_B}{h_s} \quad (4-3)$$

$$t_{\text{flächig}} = \sum_{i=1}^n (v_{\text{auf},i} \cdot s_{n,i} + v_{\text{ent},i} \cdot s_{\text{ent},i}) \cdot \frac{h_B}{h_s} \quad (4-4)$$

$$t_{\text{ges}} = t_{\text{lokal}} + t_{\text{flächig}} \quad (4-5)$$

Für die flächigen Auftragskonzepte ergibt sich hieraus ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der Anzahl an Werkstoffen, die in einen Bauprozess

4.4 Plausibilisierung anhand eines Beispiels

eingbracht werden sollen, und der Auftragsdauer. Lokale Auftragskonzepte hingegen weisen einen direkt proportionalen Zusammenhang zwischen der Fläche, auf der die verschiedenen Werkstoffe abgelegt werden müssen, und der Auftragsdauer auf.

Dies wird auch anhand von Abbildung 4-8 deutlich, welche die Auftragsdauern unter Verwendung eines flächigen und eines lokalen Auftragskonzepts für zwei Werkstoffe exemplarisch zeigt. Je nach Bauprozessgestaltung und Werkstoff kann die Neigung des Graphen für das lokale Auftragskonzept sowie die Lage der Kurve für das flächige Auftragskonzept variieren. Somit verschiebt sich auch der Break Even Point. Es ist jedoch festzuhalten, dass Bauteile, deren Flächen des zweiten Werkstoffs links von diesem Punkt liegen, schneller mit einem lokalen Auftragskonzept gefertigt werden. Im Gegensatz dazu werden Bauteile mit einem großen Flächenanteil für einen zweiten Werkstoff besser mit einem flächigen Auftragskonzept hergestellt.

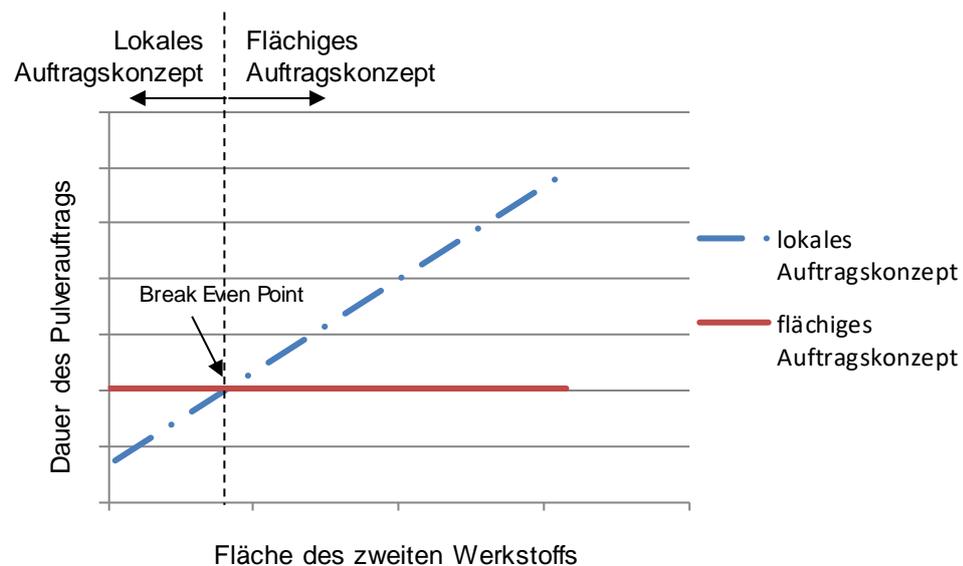


Abbildung 4-8: Exemplarische Darstellung der Auftragsdauern bei einem Bauteil aus zwei Werkstoffen mit Break Even Point

Aufgrund dieses Effekts werden nun die Auftragsdauern für die verschiedenen Konzepte bestimmt.

Damit auf eine Absaugung verzichtet werden kann, muss der Werkstoff mittels der Düse eingebracht werden, welcher als Erstes verfestigt werden muss. Bei der Verarbeitung von Stahl und einer Kupferlegierung ist dies der eisenbasierte Werkstoff. Es muss eine Fläche von $A_1 = 70045,60 \text{ mm}^2$ mit Stahlpulver aufgetragen werden. Um diese vollständig mittels einer Düse mit Pulver bei einer Schichtdicke von $60 \mu\text{m}$ zu bedenken, müssen 7297 Bahnen gefahren werden. Damit zudem eine gleichmäßige Pulverschicht entsteht, muss eine Spurüberlappung gewährleistet sein. Diese wird mit 30 % angenommen. Somit ergeben sich insgesamt 9486 Bahnen. Bei einer Ablegegeschwindigkeit von $50 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ werden hierfür 2,90 Stunden benötigt.

Hinzu kommt noch die Auftragsdauer für den zweiten Werkstoff. Da dieser im gesamten Bauraum aufgebracht wird, wird dieser mit einem flächigen Auftragskonzept aufgebracht, wie es in industriellen Anlagen standardmäßig eingebaut ist. Die Dauer hierfür beträgt ca. vier Sekunden. Somit ergibt sich für den zweiten Werkstoff eine Gesamtdauer von 0,19 Stunden. Für den ganzen Bauprozess ist daher nach den Formeln (4-3) und (4-4) eine Auftragszeit für das Material von 3,09 Stunden zu veranschlagen.

Düsen-Konzept mit Absaugung

Die Auftragsdauer für ein Düsen-Konzept mit Absaugung unterscheidet sich nur gering vom entsprechenden Konzept ohne Absaugung. Aufgrund des Absaugvorgangs kommt noch ein weiterer Prozessschritt hinzu. Da das Pulver lokal aufgetragen werden soll, muss es auch nur lokal entfernt werden. In diesem Fall wird jedoch das zweite Material aufgetragen und das erste lokal entfernt. Daher ergibt sich nach den gleichen Überlegungen wie gerade aufgeführt für den Kupferwerkstoff eine Ablegedauer von 6,09 Stunden.

Hinzu kommt noch die Dauer für das Entfernen des ersten Pulvers auf der Fläche, welche anschließend mit dem zweiten Material bedeckt werden soll. Es wird angenommen, dass die absaugbare Spurbreite ebenfalls $0,2 \text{ mm}$ beträgt und auch die Geschwindigkeit identisch ist, jedoch keine Stelle zweimal abgesaugt werden muss. Dadurch ergibt sich eine Dauer für die Entfernung des Werkstoffs von insgesamt 4,26 Stunden. In Summe beläuft sich somit die Dauer für den Pulverauftrag für den zweiten Werkstoff auf 10,35 Stunden.

Auch in diesem Fall muss noch die Auftragsdauer des im Bauraum verbleibenden Materials berücksichtigt werden. Diese ist identisch mit der des ersten Konzepts,

wodurch sich entsprechend den Formeln (4-3) und (4-4) eine gesamte Auftragszeit von 10,54 Stunden ergibt.

Beschichter-Konzept

Bei Verwendung des Beschichter-Konzepts hängt die Auftragszeit von der Länge des abzufahrenden Bereichs sowie den jeweiligen Verfahrensgeschwindigkeiten des Auftrags- bzw. Absaugmoduls ab. Die Auftragsdauer wird analog zur Auftragsdauer für den flächigen Auftrag in den vorangegangenen Konzepten übernommen. Die Dauer für den Absaugprozess wurde experimentell an der im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Anlage ermittelt. Hier beträgt die Dauer derzeit 17 Sekunden. Für 167 Schichten hat dies eine Gesamtdauer von 0,79 Stunden zur Folge.

Für den Pulverauftrag wird für jedes Material die gleiche Zeit angenommen. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden dieselben Dauern wie im lokalen Auftragskonzept ohne Absaugung angenommen, welche sich auf 0,19 Stunden für ein Material belaufen.

Insgesamt ergibt sich daher die Auftragszeit auf 1,17 Stunden.

Fotoleiter-Konzept

Bei Verwendung des Fotoleiter-Konzepts erfolgt der Pulverauftrag für jeden Werkstoff sequenziell. Die Strecke zwischen Pulveraufnahme und Pulverablage beträgt 255 mm. Unter der Annahme, dass dieselbe Strecke zurückgelegt werden muss, um eine elektrische Ladung auf den Fotoleiter aufzubringen und selektiv zu entladen, verdreifacht sich die Verfahrstrecke und somit die benötigte Zeit. Dadurch erhöht sich die benötigte Verfahrdauer auf 12 Sekunden pro Material und Schicht. Daher erfolgt die Pulverablage für das ganze Bauteil in einer Zeit von 1,11 Stunden.

Die Punktevergabe erfolgt analog zu den Auftragsdauern. Das schnellste Konzept erhält einen Punkt, während das langsamste vier Punkte erhält.

4.4.7.2 Pulverdurchmischung

Bei Verwendung des Fotoleiter-Konzepts wird der Pulverwerkstoff nur dort aufgetragen, wo er auch benötigt wird. Somit erfolgt hier keine Durchmischung der Pulverwerkstoffe. Daher erhält dieses Konzept einen Punkt.

Ebenfalls keine Pulverdurchmischung findet beim Düsen-Konzept ohne Absaugung statt, weil der erste Werkstoff nur dort aufgebracht wird, wo er benötigt wird. Im Anschluss wird der Werkstoff vollständig verfestigt. Dadurch kann keine Vermischung der Pulverwerkstoffe erfolgen. Deshalb wird das Konzept auch mit einem Punkt bewertet.

Das Düsen-Konzept mit Pulverabsaugung entfernt nur das erste Material in dem Bereich, in dem das zweite aufgebracht werden soll. In diesen Bereichen liegt nur der erste Werkstoff in Pulverform vor. Daher muss nur dieser Werkstoff dort entfernt werden. Eine Pulverdurchmischung kann nicht erfolgen. Das Auftragskonzept erhält einen Punkt.

Anders verhält es sich beim Beschichter-Konzept. Hier werden beide Werkstoffe flächig im gesamten Bauraum aufgebracht. Der Absaugprozess erfolgt ebenfalls über die gesamte Breite des Bauraums. Somit kann nicht gewährleistet werden, dass nur Pulver eines Werkstoffs entfernt wird. Das Material kann sich während des Absaugens vermischen. Die hier eingesetzten Materialien weisen jedoch unterschiedliche magnetische Eigenschaften auf. Aus dem Stand der Technik (siehe Abschnitt 2.4) geht hervor, dass diese Eigenschaft genutzt werden kann, um Werkstoffe wieder zu trennen. Damit entsteht ein weiterer Prozessschritt, welcher mit weiterem Aufwand verbunden ist. Das Pulver kann jedoch nach dieser Aufbereitung wieder eingesetzt werden. Daher wird das Konzept mit zwei Punkten bewertet.

4.4.8 Auswahl eines Auftragskonzepts

Das Ergebnis der vorangegangenen Betrachtung kann Tabelle 11-11 des Anhangs entnommen werden. Es zeigt sich, dass bei den betrachteten Auftragskonzepten und unter Berücksichtigung des Beispielbauteils das Fotoleiter-Konzept das geeignetste ist, da hier weder Querkontaminationen im Bauteil noch eine Pulverdurchmischung im Pulverbett zu erwarten sind. Gleichzeitig kann eine sehr hohe Abbildegenauigkeit erreicht werden. Somit schneidet dieses Konzept bei allen Kriterien sehr gut ab.

Im Mittelfeld liegen das Düsen-Konzept ohne Absaugung sowie das Beschichter-Konzept mit einer Punktzahl zwischen 12 und 14. Diese haben in unterschiedlichen Bereichen ihre Vor- bzw. Nachteile. Für den Pulverauftrag mittels Düsen-Konzepten müssen zusätzliche Fluidisierungsprinzipien eingesetzt werden, um

den Pulverauftrag sicherstellen zu können. Auch ist die Pulverbettqualität aufgrund der einzelnen Pulverbahnen als nicht ausreichend zu bewerten. Das Beschichter-Konzept weist zwar eine gute Pulverbettqualität auf, allerdings bereitet die Pulverdurchmischung zusätzlichen Aufwand zum Separieren der Pulverwerkstoffe.

Den höchsten Punktwert erreicht das Düsen-Konzept mit Absaugung, da hierfür eine sehr lange Auftragsdauer aufgrund der langen Verfahrswege zu erwarten ist.

4.5 Fazit

Es wurde ein Leitfaden in Form einer Checkliste entwickelt, die es einem Anwender ermöglicht, ein Auftragskonzept entsprechend den Anforderungen auszuwählen. Damit die Liste korrekt ausgefüllt werden kann, sind Vorkenntnisse im Laserstrahlschmelzen notwendig. Aufgrund der Neuheit dieser Technologie, kann dies zu falschen Einschätzungen beim Ausfüllen der Liste führen. Daher ist darauf zu achten, dass Personen mit Erfahrung im Laserstrahlschmelzen diese Liste ausfüllen.

Der Pulverauftrag für zwei Werkstoffe in einem Laserstrahlschmelzprozess kann mit unterschiedlichen Konzepten realisiert werden. Prinzipiell können Auftragsmechanismen danach unterschieden werden,

- ob ein Absaugprozess notwendig ist,
- in welchem Bereichen der Werkstoff eingebracht wird, und
- ob das Konzept in einfacher oder mehrfacher Ausführung vorliegt.

Um ein geeignetes Konzept auszuwählen, müssen die Bauteilanforderungen den Möglichkeiten der Konzepte gegenübergestellt werden. Hierbei sollten die Bauteilqualität, technologische Anforderungen und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

Mithilfe der Plausibilisierung konnten die Auswirkungen unterschiedlicher Konzepte aufgezeigt werden. Es zeigt sich, dass ein flächiges Auftragskonzept nach dem Fotoleiterprinzip die geringsten technologischen Anforderungen aufweist. Unter Beispielsweise Einsatz von Hilfsmitteln im Pulver, können viele verschiedene Werkstoff verarbeitet werden. Gleichzeitig verspricht dieser Ansatz eine hohe Bauteilqualität aufgrund einer hohen Pulverbettqualität und einer guten Abbildegenauigkeit. Ebenso ist auch bei einer hohen Anzahl an Probekörpern keine

lange Auftragsdauer zu erwarten. Daher wird ein solches Konzept im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt und zur Analyse des Fertigungsprozesses eingesetzt.

5 Die LBM-Multimaterial-Prozesskette

Die Multimaterialverarbeitung wirkt sich auf die gesamte additive Prozesskette aus, wie in Abbildung 5-1 zu sehen ist. Die Einteilung in die unterschiedlichen Phasen Pre-Prozess, In-Prozess und Post-Prozess ist identisch mit der Monomaterialverarbeitung (vgl. VDI 3405). Jedoch sind in jedem einzelnen Prozessschritt Veränderungen notwendig, um ein Multimaterialbauteil zu fertigen.

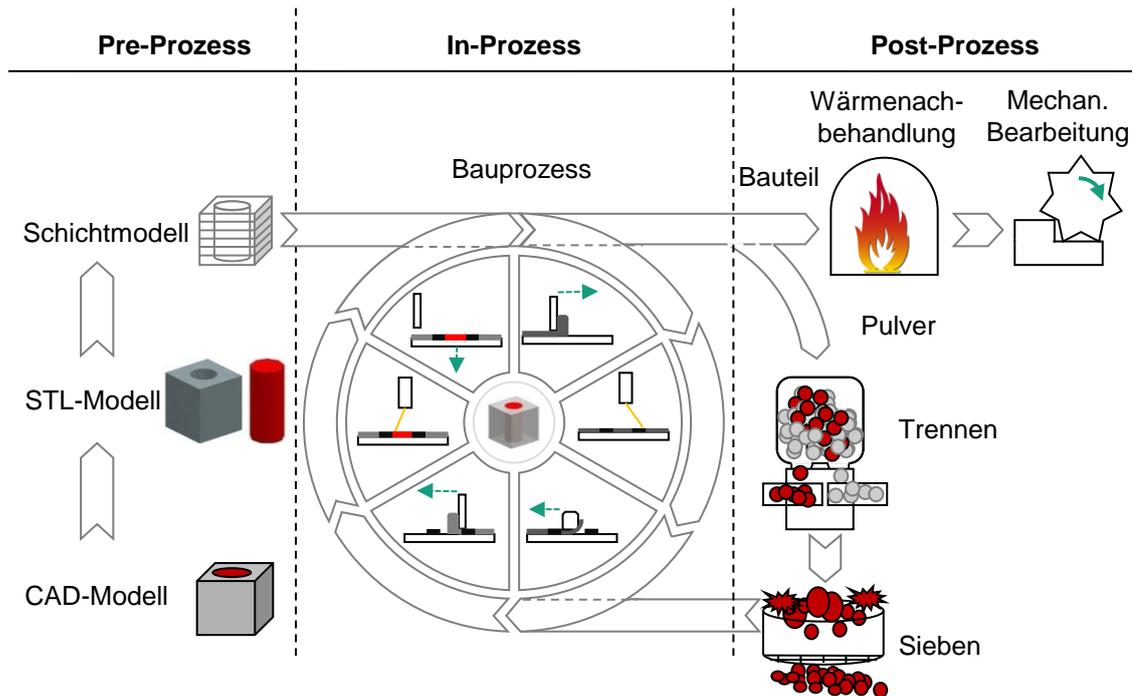


Abbildung 5-1: Darstellung der aktuellen LBM-Multimaterial-Prozesskette

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf den Einfluss auf den Pre-, In- und Post-Prozess näher eingegangen. Es werden basierend auf dem aktuellen Stand der Technik Lösungskonzepte dargelegt, die die Herstellung von Multimaterialbauteilen im Laserstrahlschmelzprozess ermöglicht. Der Post-Prozess des Bauteils in Form von Wärmehandlung und mechanischer Bearbeitung wird hierbei ausgespart.

5.1 Multimaterial Pre-Prozess

Der erste Schritt zur Fertigung eines Multimaterialbauteils mittels Laserstrahlschmelzen ist die Erzeugung der Daten. Entsprechend dem Vorgehen aus dem Monomaterialprozess werden hier aus den CAD-Daten die schichtbasierten Daten ge-

neriert. Hierzu wird derzeit das STL-Format (Standard Tessilation Language) genutzt. Mit diesem können allerdings nur Informationen zu Oberflächen und diese auch nur in mittels Triangulation genäherter Form gespeichert werden (GEBHARDT 2017). Eine Einteilung in unterschiedliche Regionen, für unterschiedliche Werkstoffe und somit unterschiedliche Parametersätze ist nicht möglich. Daher ist es momentan notwendig, für jeden einzelnen Parametersatz, der in einem Werkstück verwendet werden soll, ein eigenes virtuelles Bauteil vorzubereiten. Dies macht die Datenvorbereitung derzeit sehr aufwendig und fehleranfällig. Dennoch gibt es bereits Datenformate, die weitere Informationen zu Werkstoffen, Oberflächen sowie mehrere Parametersätze speichern können. Zu diesen Datenformaten gehört beispielsweise das AMF-Format (DIN EN ISO/ASTM 52915:2017-10) oder das 3MF (3D Manufacturing Format) (3MF CONSORTIUM 2017). Diesen Formaten ist es möglich, unterschiedlichen Regionen in einem Bauteil verschiedene Parametersätze zuzuweisen. So kann ein Multimaterialbauteil mit diskreten oder gradierten Werkstoffübergängen definiert werden. Hierdurch können mögliche Fehler durch falsches Positionieren von mehreren werkstoffspezifischen Bereichen vermieden werden.

5.2 Multimaterial In-Prozess

Aus dem im Pre-Prozess erzeugten virtuellen Bauteil wird im Verlauf des In-Prozesses ein reales Bauteil hergestellt. Hierzu sind Anpassungen in der Anlagentechnik, sowie im Prozessablauf notwendig. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

5.2.1 Anlagentechnik

Für die Herstellung der Multimaterialprobekörper kommt in dieser Arbeit ein flächiges Pulverauftragskonzept mit Pulverentfernung zum Einsatz. Ein Ziel dieser Arbeit ist, die Herstellungsfähigkeit von Multimaterialbauteilen im Laserstrahlschmelzprozess zu zeigen. Die genannte Technologie bietet hierzu eine sehr gute Grundlage, da dies ein etabliertes Konzept ist, welches zu sehr guten Resultaten im Monomaterialprozess führen kann. Störgrößen, welche aufgrund des Auftragskonzepte auftreten könnten, können minimiert werden. Darüber hinaus wurde das gewählt ein flächiges Pulverauftragskonzept mit Pulverentfernung, da die Technologie leicht in bestehende Laserstrahlschmelzanlagen umgesetzt werden kann. Hierzu wurde das Anlagenkonzept mit Pulverzuführung von oben adaptiert. Das Beschichtermodul entspricht dem in Abbildung 2-10 linken Konzept. Um einen automatisierten Pulverauftrag von zwei unterschiedlichen Werkstoffen

zu ermöglichen, wurde in der Mitte des Moduls eine Trennwand ergänzt. Mithilfe der beiden Förderwellen und der mittig angebrachten Beschichterlippe auf der Unterseite des Moduls ist es möglich, abhängig von der Verfahrrichtung ein Material aufzubringen. Zur Entfernung des Materials wird an einer Stirnseite eine Absaugvorrichtung angebracht. Der gesamte Aufbau des Multimaterialauftragsmoduls ist in Abbildung 5-2 zu sehen.

Von der Absaugereinheit wird das abgesaugte Pulver in einen Tank befördert. Das gesamte Anlagenkonzept ist in Abbildung 5-3 gezeigt.

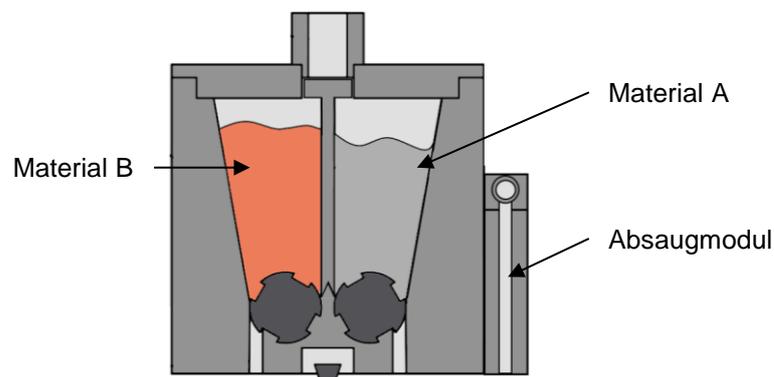


Abbildung 5-2: Schnittansicht des Aufbaus des Multimaterialauftragsmoduls

Liegt ein Anlagenkonzept vor, welches die Pulverzuführung von unten vorsieht, besteht ebenfalls die Möglichkeit, diese zu einer Multimaterial-Anlage zu erweitern. Hierzu muss für jeden Werkstoff eine Vorratskammer und ein Materialüberlauf vorgesehen werden. Um Querkontaminationen zu vermeiden und den Pulverauftrag mit einem Beschichtungsmodul zu gewährleisten, müssen ansteuerbare Abdeckungen über den bauraumnahen Vorratsbehälter und Überlaufbehälter vorgesehen werden. Der Aufbau eines solchen Anlagenkonzepts ist in Abbildung 5-4 gezeigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das erstgenannte Anlagenkonzept umgesetzt. Bei Verwendung einer Anlage mit Pulverzuführung von unten müsste der gesamte Bauraum erweitert werden. Hierdurch ist eine prototypische Umsetzung nur mit hohem konstruktiven Aufwand möglich. Nachteilig an einem Anlagenkonzept mit Pulverzuführung von oben ist der Einsatz eines lokalen Pulvervorratssystems. Aufgrund der Förderung des Pulverwerkstoffs aus dem lokalen Vorratsbehälter im Beschichtungsmodul mithilfe von Förderwellen (je Kammer eine Welle) ist dieses Konzept aktuell auf zwei Werkstoffe pro Bauprozess beschränkt. Eine Erweiterung auf weitere Werkstoffe ist mit diesem Konzept und dem in dieser Arbeit eingesetzten Beschichtungsmodul nicht möglich.

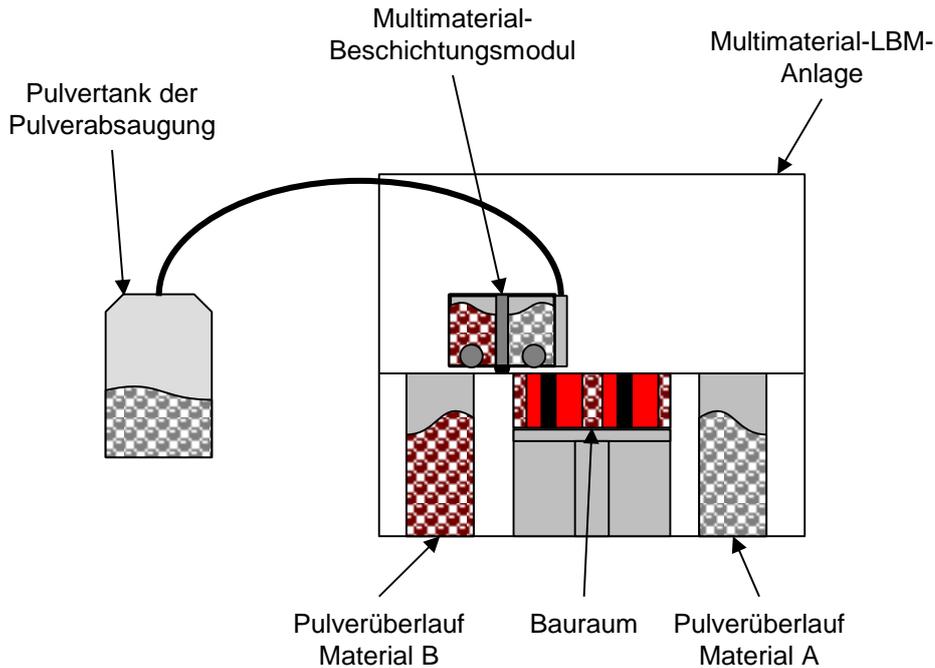


Abbildung 5-3: LBM-Multimaterial-Anlagenkonzept mit Materialzuführung von oben

Sollen mehr als zwei Werkstoffe in einem Prozess verarbeitet werden, ist eine Kombination von beiden Konzepten am vielversprechendsten. Die Zuführung von oben ermöglicht dazu eine einfache und platzsparende Möglichkeit, wobei für jeden Werkstoff ein gesonderter Materialüberlauf, wie er im zweiten Konzept umgesetzt ist, vorgesehen werden muss.

5.2.2 LBM-Prozess

Der Prozessablauf gestaltet sich wie in Abbildung 5-5 dargestellt. Zunächst wird Material A flächig auf der Bauplatte aufgebracht und im Anschluss selektiv verfestigt. Mithilfe eines Absaugmoduls wird danach das nicht verfestigte Material der aufbrachten Schicht wieder entfernt. Im Folgenden wird die Schicht wieder flächig mit dem zweiten Werkstoff aufgefüllt. Dieser wird ebenfalls selektiv verfestigt, bevor sich die Bauplatte um eine Schichtdicke absenkt.

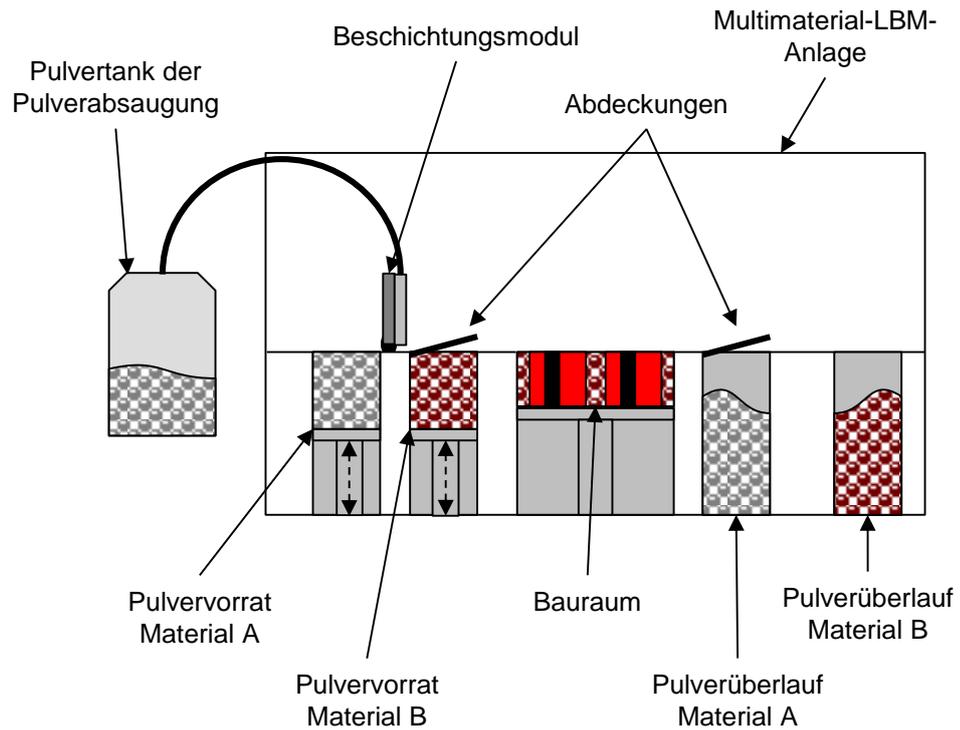


Abbildung 5-4: LBM-Multimaterial-Anlagenkonzept mit Materialzuführung von unten

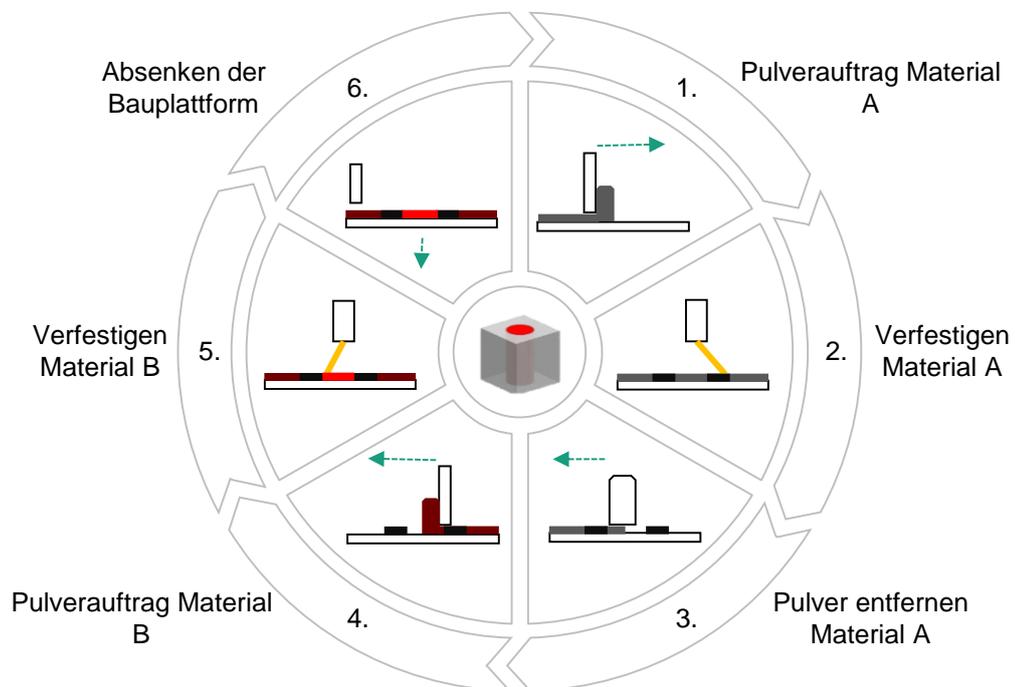


Abbildung 5-5: Prozessablauf des Multimaterialprozesses

Erste Fertigungsversuche zeigten eine hohe Querkontamination. Dies wird auf Pulverübertragungen während des Fertigungsprozesses zurückgeführt. Um diese

Hypothese zu überprüfen, wurden Videoaufnahmen des Fertigungsprozesses analysiert. Abbildung 5-6 zeigt hieraus Einzelbildaufnahmen nach jedem Prozessschritt. In der Mitte jeder Aufnahme sind die zu fertigenden Probekörper zu sehen. Zunächst findet der Pulverauftrag von Material 1 (in diesem Fall Werkzeugstahl 1.2709, grau) statt. Das aufgetragene Pulver wird selektiv verfestigt, sowie das übrige Pulver der Schicht entfernt, bevor das zweite Material (in diesem Fall Kupferlegierung CW106C, rot-braun) im gesamten Bauraum aufgetragen und anschließend verfestigt wird.

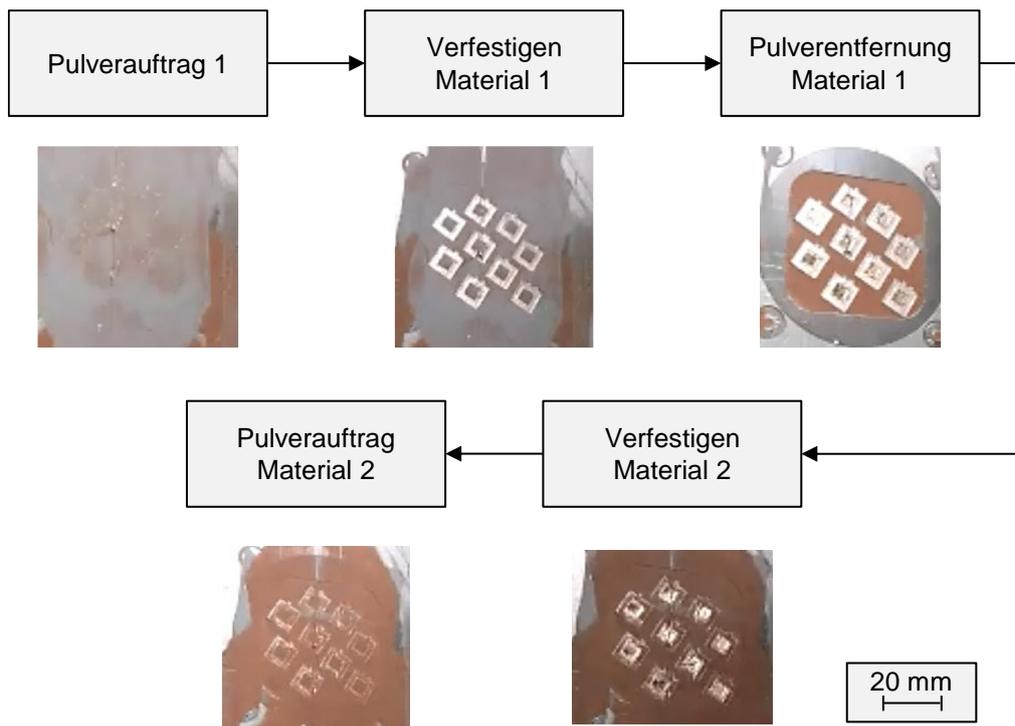


Abbildung 5-6: Ansicht des Pulverbetts während des Multimaterial-Laserstrahlschmelzprozesses zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Fertigungsprozess

Beim Auftragen des zweiten Materials (hier CW106C) fällt auf, dass der Werkstoff im gesamten Bauraum aufgebracht wird. Es werden also auch die bereits verfestigten Bereiche aus Werkzeugstahl 1.2709 mit der Kupferlegierung CW106C bedeckt. Dies kann im späteren Bauteil zu Querkontaminationen führen. Hierfür ist eine Reduzierung der Schichtdicke infolge des Aufschmelzens verantwortlich (siehe Abbildung 5-7).

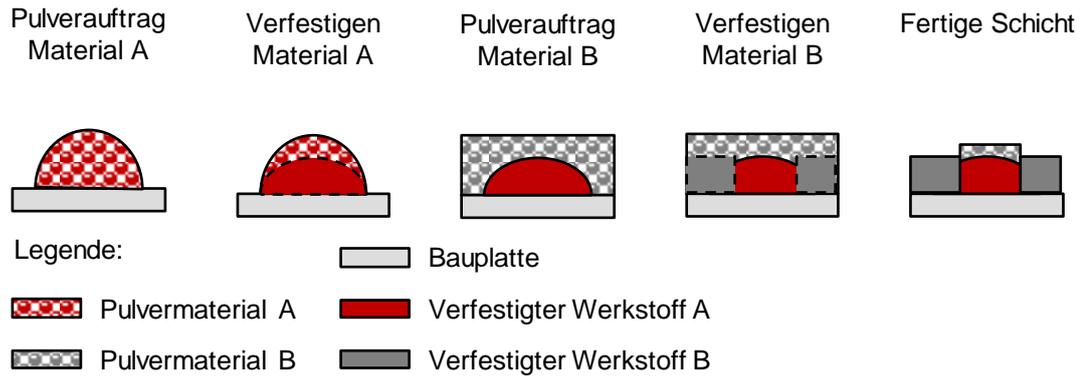


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung von Querkontaminationen infolge der Schichtdickenreduzierung während des Verfestigens

Im Zuge des Aufschmelzens der Pulverschicht mit dem Ziel, ein Bauteil mit einer relativen Dichte von mehr als 99 % zu erreichen, reduziert sich die Schichtdicke. Dieser Effekt wurde von HEß (2015) für 2.4668 sowie von SPIERINGS & LEVY (2009b) für den Werkstoff 316L beobachtet. Beim Auftragen erreicht das Pulverbett eine Dichte von ca. 53–63 % (KARAPATIS ET AL. 1999). Im fertigen Bauteil wird eine relative Dichte von mehr als 99 % erreicht. Dies hat zur Folge, dass sich die Pulverschichthöhe reduziert. Somit ist es möglich, dass Pulver auf bereits belichteten Bereichen liegen bleibt, ohne dass die Bauplatte abgesenkt wird. Diese ermöglicht es, dass nachdem Material A belichtet wurde, beim Auftragen des zweiten Materials auch im werkstoffspezifischen Bereich von Werkstoff A Pulver B liegen bleibt (siehe Abbildung 5-8). Hierdurch liegen in einem Bereich beide Werkstoffe vor. Die Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung in diesem Bereich führen zu Modifikationen im Absorptionsverhalten, der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität, wodurch die benötigte Volumenenergie zum Aufschmelzen der Werkstoffe beeinflusst wird. Dies kann auch anhand der gefertigten Probekörper aus Pulvermischungen gesehen werden, welche eine andere Volumenenergie benötigen, um aufgeschmolzen zu werden (vgl. Abbildung 6-12).

Eine weitere Ursache können Spritzer sein, welche im Fertigungsprozess entstehen (ANWAR & PHAM 2018). Diese können aufgrund des in der Prozesskammer notwendigen Schutzgasstroms auch in Bereichen des jeweils anderen Werkstoffs getragen werden, wodurch Querkontaminationen entstehen können. Zusätzlich weichen diese Partikel in Form und Größe von den im Laserstrahlschmelzprozess verwendeten Partikelgrößenverteilungen ab. Hierdurch kann insbesondere bei großen Partikeln der Absaugprozess erschwert werden, weswegen sie im Bauraum verbleiben.

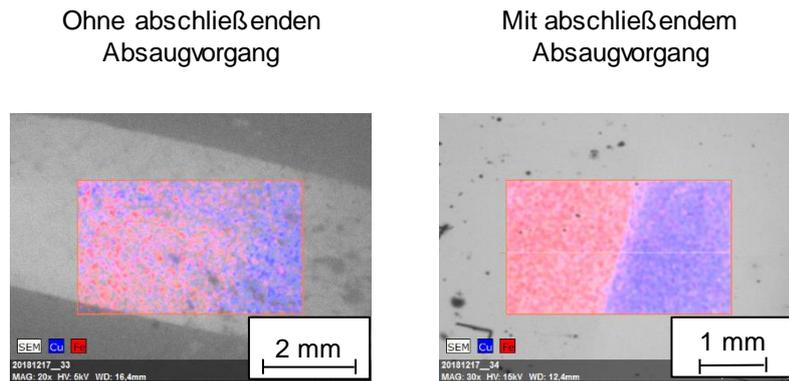


Abbildung 5-8: EDX-Analysen eines Probekörpers aus Kupferlegierung CW106C und Werkstoffstahl 1.2709 mit Cu als Referenzwerkstoff für CW106C und Fe als Indikator für 1.2709 mit Belichtungsreihenfolge 1.) 1.2709 und 2.) CW106C. Links: ohne Absaugprozess nach der Belichtung von CW106C, rechts: mit Absaugprozess nach der Belichtung von 1.2709

Für alle folgenden Untersuchungen wurde daher nach dem Verfestigen des zweiten Werkstoffs ein zusätzlicher Absaugvorgang ergänzt, der lose Partikel aus bereits verfestigten Bereichen entfernt.

Im Fertigungsprozess wird zunächst ein Werkstoff aufgeschmolzen und beim Abkühlen verfestigt. Nach dem Auftragen des zweiten Werkstoffs wird dieser auch aufgeschmolzen. Zur Herstellung von Multimaterialbauteilen spielt insbesondere der Übergangsbereich der beiden Materialien eine wichtige Rolle. Dieser wird frühestens aufgeschmolzen, wenn das erste Material A bereits fest ist und somit die Eigenschaften des Feststoffs aufweist. Das zweite Material B ist entweder noch in Pulverform oder gerade verfestigt. Die Verbindung der beiden Werkstoffe erfolgt durch ein Aufschmelzen beider Bereiche. Somit erfolgt das Vermischen beider Werkstoffe zum einen infolge einer sich ausbildenden Maragoni-Strömung in der Schmelzphase, zum anderen durch Diffusion einzelner Atome in der Festphase. In diesem Übergangsbereich liegen somit beide Werkstoffe (vgl. Abbildung 5-9).

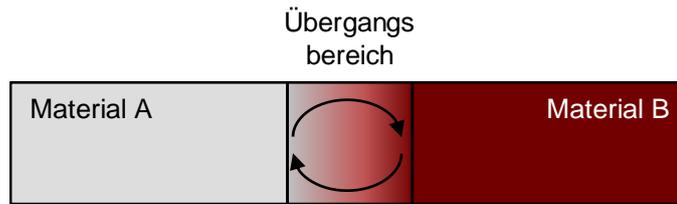


Abbildung 5-9: Darstellung der Materialbereiche in einem Multimaterial-Bauteil mit Verdeutlichung der Materialvermischung im Übergangsbereich

Neben der Vermischung auf metallurgischer Ebene, treten physikalische Effekte auf, die bereits aus der Monomaterialverarbeitung bekannt sind. Hier ist vor allem der thermisch bedingte Verzug zu nennen. Dieser tritt je nach Werkstoff unterschiedlich stark auf. Da hier zwei verschiedene Werkstoffe miteinander kombiniert werden, ist dieser im Bauteil nicht homogen, sondern kann abhängig von Materialzusammensetzung am jeweiligen Ort variieren.

5.3 Multimaterial Post-Prozess

Nach der Herstellung der Bauteile unter Berücksichtigung von auftretenden Effekten, wie sie gerade aufgeführt wurden, schließt sich der Post-Prozess an. Der Einsatz einer neuen Technologie im industriellen Umfeld wird nur dann möglich, wenn sie sich wirtschaftlich gestaltet. Ein wichtiger Faktor für das Laserstrahlschmelzen ist die Wiederverwendbarkeit der Pulverwerkstoffe. Im Multimaterialprozess kommt es allerdings – zum einen aufgrund von Spritzerbildungen als Folge der Prozessdynamik, zum anderen infolge des Auftragskonzepts – zu Durchmischungen von nicht verfestigtem Pulver im Pulverbett, den Überläufen oder der Absaugeinheit. Daher wird im Folgenden überprüft, inwiefern es möglich ist, die Pulverwerkstoffe wieder sortenrein zu separieren (nachfolgend auch „trennen“ genannt).

Erfolgt im Prozess eine Durchmischung beider Werkstoffe, entweder aufgrund des Auftragskonzepts oder während des Verfestigungsvorgangs als Folge von Spritzerbildung, ist es notwendig, die Werkstoffe wieder voneinander zu separieren, um sie wiederverwenden zu können. Wie in Abschnitt 2.2.3 aufgeführt, existiert bereits eine Vielzahl an Verfahren, welche unter Ausnutzung unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften sowie unterschiedlicher Trennprinzipien Materialien wieder trennen.

Um ein geeignetes Trennprinzip auszuwählen, muss zunächst eine Analyse der Reinstoffe erfolgen. Ziel dieser Analyse ist es, Eigenschaften zu identifizieren, in denen sich die Pulverwerkstoffe möglichst stark unterscheiden. Dieser Unterschied kann genutzt werden, um die Werkstoffe wieder zu separieren. Im Betrachtungsrahmen sollten neben den Werkstoffeigenschaften auch die Pulvereigenschaften, wie Korngrößenverteilung, liegen.

Die Dichte der beiden Werkstoffe unterscheidet sich nur geringfügig. Sie beträgt $8,04 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ für den Werkzeugstahl und $8,91 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ für die Kupferlegierung. Um eine zuverlässige Pulvertrennung sicherstellen zu können, ist dieser Unterschied zu gering. Daher können Verfahren, die die Dichte zur Separierung zweier Werkstoffe ausnutzen, nicht eingesetzt werden.

Aufgrund der engen Korngrößenverteilungen und der damit einhergehenden geringen Unterschiede in der Masse scheiden auch Verfahren aus, die diese Eigenschaft ausnutzen.

Eine weitere Möglichkeit ist die von CHIVEL (2016) erläuterte Möglichkeit, unterschiedliche Korngrößenfraktionen für beide Werkstoffe einzusetzen und, nach dem Fertigungsprozess mittels Sieben, die Pulverwerkstoffe wieder zu separieren. Hierbei stellen sich jedoch mehrere Herausforderungen. So liegt der Fraktionsbereich für den Laserstrahlschmelzprozess, um eine gute Verarbeitbarkeit und gleichzeitig Bauteile mit hohen Dichten zu ermöglichen, zwischen $20 \mu\text{m}$ und $63 \mu\text{m}$. Um eine Trennbarkeit der Werkstoffe zu gewährleisten, muss dieser Bereich aufgeteilt werden in zwei Fraktionen, beispielsweise $20\text{--}45 \mu\text{m}$ und $45\text{--}63 \mu\text{m}$. Es muss jedoch bedacht werden, dass im Fertigungsprozess Schmelzspritzer mit unterschiedlichen Korndurchmessern entstehen. In einem nachgelagerten Siebprozess kann es daher passieren, dass Partikel des einen Werkstoffs im Fraktionierungsbereich des anderen Werkstoffs liegen. Dadurch kann keine 100%ig reine Separierung auf Basis der Korngrößenfraktionierung erfolgen.

Physikalisch unterscheiden sich die Werkstoffe Kupferlegierung CW106C und Werkstoffstahl 1.2709 in ihren magnetischen Eigenschaften. Während die Kupferlegierung CW106C weder para- noch ferromagnetisch ist (DEUTSCHES KUPFERINSTITUT 2005), weist Werkstoffstahl 1.2709 aufgrund seines Eisenanteils ferromagnetische Eigenschaften auf.

Unterschiede liegen auch in den farblichen Eigenschaften der beiden Werkstoffe. Dies stellt eine weitere Möglichkeit dar, mithilfe einer Farberkennung und beispielsweise einem Druckluftsystem die Werkstoffe wieder zu separieren.

Herausfordernd ist die Tatsache, dass im industriellen Umfeld eine Trennung von Partikeln mit Durchmessern, wie sie im LBM-Verfahren zum Einsatz kommen, derzeit nicht existiert. Eine Plausibilisierung der magnetbasierten Trennung für die Werkstoffkombination 1.2709 und CW106C kann dem Anhang 11.3 entnommen werden.

5.4 Fazit

Das vorangegangene Kapitel zeigte alle Auswirkungen der Multimaterialverarbeitung auf den LBM-Prozess. Darüber hinaus wurden mögliche und notwendige Anpassungen des aktuellen Stands der Technik aufgezeigt, die notwendig sind, um diesen Prozess zur Multimaterialverarbeitung zu nutzen.

Wird sich die Multimaterialverarbeitung in den nächsten Jahren industriell etablieren, ist zu erwarten, dass einige bislang noch notwendige Zwischenschritte wegfallen und somit die Herstellung von Multimaterialbauteilen vereinfacht wird. Dies betrifft vor allem die Datenvorbereitung im Pre-Prozess sowie die Materialaufbereitung im Post-Prozess.

Zur Datenvorbereitung im Pre-Prozess ist es derzeit notwendig, für jeden Parametersatz ein eigenes virtuelles Bauteil zu erzeugen und dieses in der Vorbereitungssoftware manuell zu positionieren. Dies kann ggf. zu Fehlern und somit zu Fehlstellen im späteren Bauteil führen. Neue Datenformate wie das AMF-Format können mehr Informationen speichern. Dadurch können in einem Bauteil unterschiedliche Bereiche definiert und somit verschiedene Prozessparameter einem Bauteil zugewiesen werden. Diese Formate können derzeit noch nicht von der Anlagentechnik verarbeitet werden.

Um mit einer industriellen LBM-Anlage Multimaterialbauteile herstellen zu können, sind weitreichende Anpassungen notwendig. Die Pulverzuführung von oben mithilfe eines Beschichtermoduls mit lokalem Pulvervorrat stellt eine einfache Möglichkeit dar, da das Auftragsmodul durch die Integration einer Trennwand einfach in zwei Kammern unterteilt werden kann. Dadurch wird je nach Auftragsrichtung Material A oder Material B aufgebracht. Durch Verwendung einer Beschichtertlippe besteht jedoch immer die Gefahr von Partikelübertragungen. Soll dieses Konzept auf mehr als zwei Werkstoffe erweitert werden, müsste das Auftragsmodul vergrößert werden oder ein komplexes Pulverzuführsystem in die Anlagen-

technik integriert werden. Zum Auffangen des aus dem Fertigungsprozess entfernten Pulvers ist ein extra Sammel-tank notwendig. Alternativ könnte das Pulver auch in einem der beiden Überläufe gesammelt werden.

Um Querkontaminationen zu vermeiden, ist es notwendig, nach jedem Verfestigungsauftrag Pulver zu entfernen. Dies erhöht zum einen weiter den Materialaufwand. Zum anderen muss mehr Material im Nachgang wieder separiert werden.

Für die Pulveraufbereitung im Post-Prozess existieren aktuell noch keine industriellen Konzepte. Aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften ist es jedoch möglich, die Werkstoffe voneinander zu separieren und so in weiteren Fertigungsprozessen wiederzuverwenden.

6 Entwicklung der Multimaterialprozessparameter

Zur Herstellung von Multimaterialprobekörpern ist der In-Prozess ein elementarer Bestandteil. Im Monomaterialprozess wird dieser durch die optischen und thermischen Werkstoffeigenschaften bestimmt und kann über die Prozessparameter gesteuert werden (GUSAROV & SMUROV 2010). Die optischen Eigenschaften bestimmen hierbei unter anderem, wie der Laserstrahl im Material aufgenommen wird. Die thermischen Eigenschaften entscheiden darüber, wie die entstehende Wärmeenergie weitergeleitet wird (GUZMÁN & HERNÁNDEZ ARROYO 2016). Diese Aspekte sind für die Multimaterialverarbeitung von besonderer Bedeutung, weil nicht mehr von einem konstanten Gesamtsystem ausgegangen werden kann. Daher ist es notwendig, die Einflüsse und die Wechselwirkungen von unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften auf den Laserstrahlschmelzprozess zu betrachten, mögliche Steuergrößen zu identifizieren und im Anschluss zu analysieren (Abbildung 6-1). Zur Identifikation von Steuergrößen werden Multimaterialprobekörper mit makroskopischer und mikroskopischer Materialverteilung auf einer SLM 250 HL gefertigt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf werkstoffwissenschaftliche und prozessbedingte Wechselwirkungen werden herangezogen, um mögliche Steuergrößen für den Multimaterialprozess zur Herstellung von 3-D-Multimaterialprobekörpern zu identifizieren. Als Abschluss werden die Steuergrößen in der Fertigung von 3-D-Multimaterialbauteilen auf einer für den Multimaterialprozess angepassten SLM 250 HL analysiert. Als Auftragskonzept kommt ein Beschichtermechanismus mit Absaugung zum Einsatz.

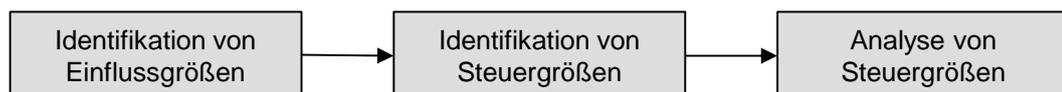


Abbildung 6-1: Vorgehen zur Identifikation und Analyse von Steuergrößen des 3-D-Multimaterialprozesses

6.1 Identifikation von Einflussgrößen

Damit sukzessive ein tiefgreifendes Prozessverständnis aufgebaut werden kann, werden zunächst die Prozessparameter für die Monomaterialien validiert. Im Anschluss werden die beiden Werkstoffe miteinander kombiniert. Um ein Verständ-

nis auf makroskopischer Ebene zu schaffen, werden 2-D-Multimaterialbauteile gefertigt. Zur Analyse der Effekte auf mikroskopischer Ebene werden Pulvermischungen hergestellt und diese im LBM-Prozess verarbeitet (siehe Abbildung 6-2).

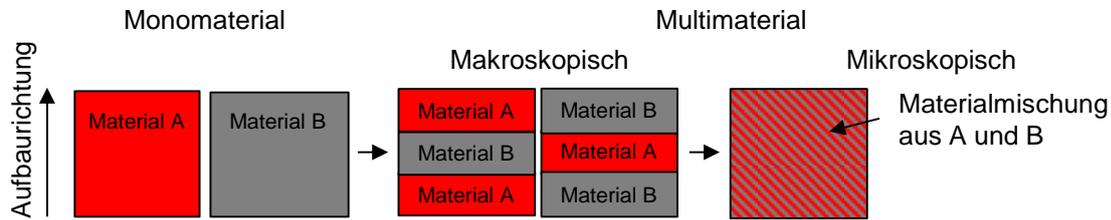


Abbildung 6-2: Vorgehen zur Identifikation der Einflussgrößen auf den Multimaterialprozess

6.1.1 Validierung der Prozessparameter für den Monomaterialprozess

Aufgrund von unterschiedlichen Anlagenzuständen, wie beispielsweise Verschleiß der Scanneroptik oder eines laserinduzierten Fokusversatzes, variieren die Parameter von Anlage zu Anlage (BEAN ET AL. 2018). Daher wird eine Validierung der Prozessparameter aufbauend auf den bestehenden Erkenntnissen durchgeführt. Somit wird sichergestellt, dass die eingesetzten Parameter zu Bauteilen mit einer relativen Dichte von mindestens 99 % führen und keine Fehlstellen in Form von Poren, Lunkern oder Bindefehler sowie keine Risse oder Delaminationen entstehen.

6.1.1.1 Validierung Stahl 1.2709

Für die Qualifizierung des Werkzeugstahls wurden hierzu insgesamt 40 Proben gefertigt, wobei der Spurbstand, die Belichtungsgeschwindigkeit und die Laserleistung variiert wurden. Zur statistischen Absicherung wurden mit jedem Prozessparametersatz zwei Probekörper gefertigt. Der Versuchsplan ist im Anhang 11.2 unter Tabelle 11-1 zu finden. Ein Überblick über die Prozessparameter wird in Tabelle 6-1 gegeben.

Die Ergebnisse der Dichteanalysen mittels archimedischem Prinzip und Bildauswertung sind in Abbildung 6-3 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Auswertungsmethoden vorliegt. Auch erreicht die Mehrheit der Messwerte die geforderte relative Dichte von 99 %.

6.1 Identifikation von Einflussgrößen

Tabelle 6-1: Untersuchte Prozessparameter zur Qualifizierung von 1.2709 für den Laserstrahlschmelzprozess

	Einheit	Wert
Laserleistung P_L	W	175 – 225
Belichtungsgeschwindigkeit v_s	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	450 – 600
Spurabstand s_a	μm	90 – 120
Schichtdicke h_s	μm	30
Vorheiztemperatur T_{HV}	$^{\circ}\text{C}$	200

Um einen guten Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und hoher Qualität zu erhalten, wurde ein Parametersatz mit 200 W Laserleistung, $600 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ Belichtungsgeschwindigkeit und 0,105 mm Spurabstand gewählt (siehe Abbildung 6-3 rechts). Dieser erreichte eine relative Dichte von 99,8 %, was einer Restporosität von 0,2 % entspricht.

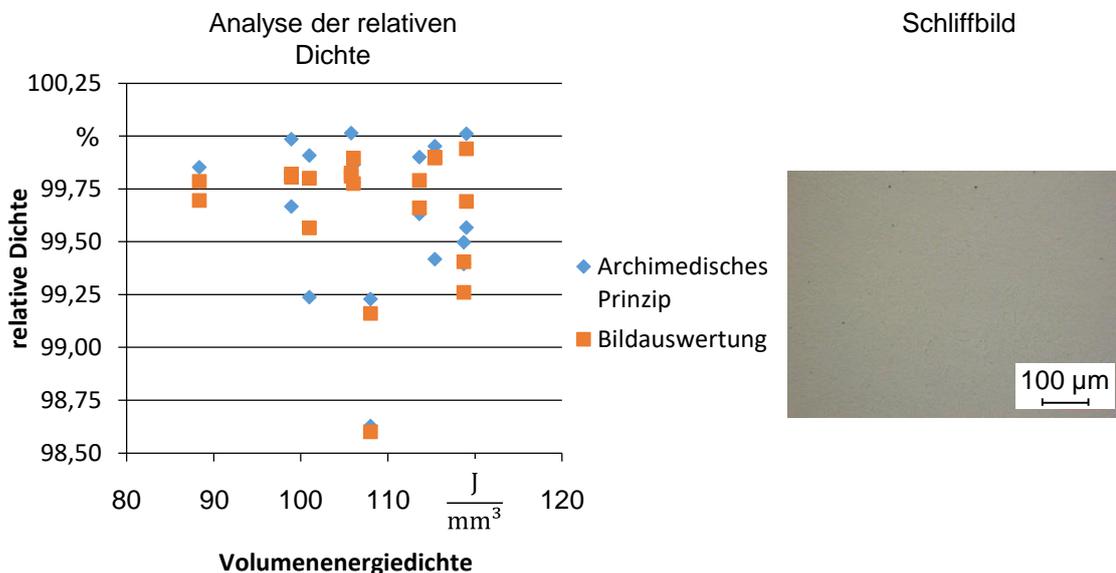


Abbildung 6-3: Links: Analyse der relativen Dichte der Proben aus Stahl 1.2709; rechts: Mikroskopaufnahme eines Schliffs gefertigt mit $P_L = 200 \text{ W}$, $v_s = 600 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und $s_a = 0,105 \text{ mm}$

6.1.1.2 Validierung Kupferlegierung CW106C

Ausgangsbasis zur Validierung des Prozessparametersatzes zur Verarbeitung der Kupferlegierung CW106C sind die Untersuchungen von BECKER (2014) und UHLMANN ET AL. (2016) (vgl. Abschnitt 3.1.2). Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde das in Tabelle 6-2 dargestellte Parameterfenster betrachtet. Der vollständige Versuchsplan befindet sich im Anhang in Tabelle 11-2.

Tabelle 6-2: Untersuchte Parameter zur Validierung der Kupferlegierung CW106C für den Laserstrahlschmelzprozess

	Einheit	Wert
Laserleistung P_L	W	400
Belichtungsgeschwindigkeit v_s	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	100 – 600
Spurabstand s_a	μm	75 – 200
Schichtdicke h_s	μm	30
Vorheiztemperatur T_{HV}	$^\circ\text{C}$	200

Um die maximalen Aufbauraten realisieren zu können, wurde die Laserleistung auf 400 W festgesetzt. Laut den Untersuchungen von BECKER (2014) sind ab einer Belichtungsgeschwindigkeit von $500 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ mehr als 400 W bei einem Fokussdurchmesser von $100 \mu\text{m}$ zum Aufschmelzen des Pulverbetts notwendig. Bei höheren Belichtungsgeschwindigkeiten ist die eingebrachte Energie nicht mehr ausreichend, um den Werkstoff aufzuschmelzen. Um mögliche Abweichungen darstellen zu können, ohne dabei das Versuchsfenster zu stark zu vergrößern, wurde die Belichtungsgeschwindigkeit auf maximal $600 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ begrenzt. Der Spurabstand wurde aufbauend auf den von BECKER (2014) ermittelten Spurbreiten bestimmt.

Abbildung 6-4 zeigt die Auswertung der relativen Dichte bei unterschiedlichen Belichtungsgeschwindigkeiten und verschiedenen Spurabständen. Die Darstellung mit Standardabweichung ist in Anhang 11.6 in Abbildung 11-6 zu sehen.

Im Fertigungsprozess mussten die Proben mit $200 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ Belichtungsgeschwindigkeit und den Spurabständen $0,075 \text{ mm}$, $0,1 \text{ mm}$ und $0,125 \text{ mm}$ abgebrochen werden, da sich bereits bei geringen Schichthöhen starke Aufwölbungen infolge der hohen Volumenenergie bildeten. Bei den gefertigten Proben ist ein klarer Trend zu geringeren relativen Dichten bei größeren Spurabständen zu erkennen. Dieser Trend

6.1 Identifikation von Einflussgrößen

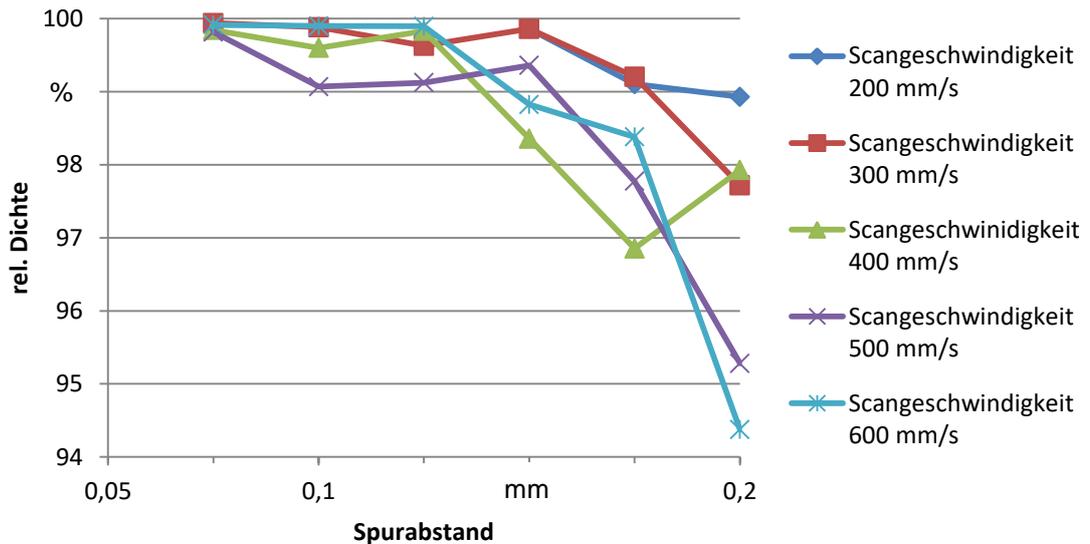


Abbildung 6-4: Grafische Darstellung der relativen Dichte der Kupferlegierung CW106C bestimmt unter Verwendung der Methode der Binarisierung bei unterschiedlichen Belichtungsgeschwindigkeiten und Spurabständen sowie konstanter Laserleistung von 400 W

verstärkt sich bei höheren Belichtungsgeschwindigkeiten und lässt sich auf schmalere Schmelzbahnen und somit auf zu große Spurabstände zwischen den einzelnen Schmelzbahnen zurückführen (siehe Abbildung 6-5).

Es konnten bei mehreren Parameterkombinationen relative Dichten von mehr als 99 % erreicht werden. Die höchsten Werte konnten mit der maximalen Belichtungsgeschwindigkeit von $600 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und Spurabständen zwischen 0,075 mm und 0,125 mm erzielt werden. Ebenfalls waren die Standardabweichungen bei diesen Prozessparameterkombinationen mit Werten zwischen 0,01 und 0,03 sehr gering, was auf einen stabilen Fertigungsprozess schließen lässt. Um möglichst hohe Aufbauraten zu erzielen, wurde die maximale Belichtungsgeschwindigkeit von $600 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ für die folgenden Untersuchungen gewählt. Die Vorversuche haben ergeben, dass bei dieser Geschwindigkeit bei einem Spurabstand von 0,125 mm noch die angestrebte relative Dichte von über 99 % erreicht werden kann.

Die identifizierten Prozessparameter werden zur Analyse der Effekte eines Multi-materialprozesses auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene im Folgenden eingesetzt.

6.1 Identifikation von Einflussgrößen

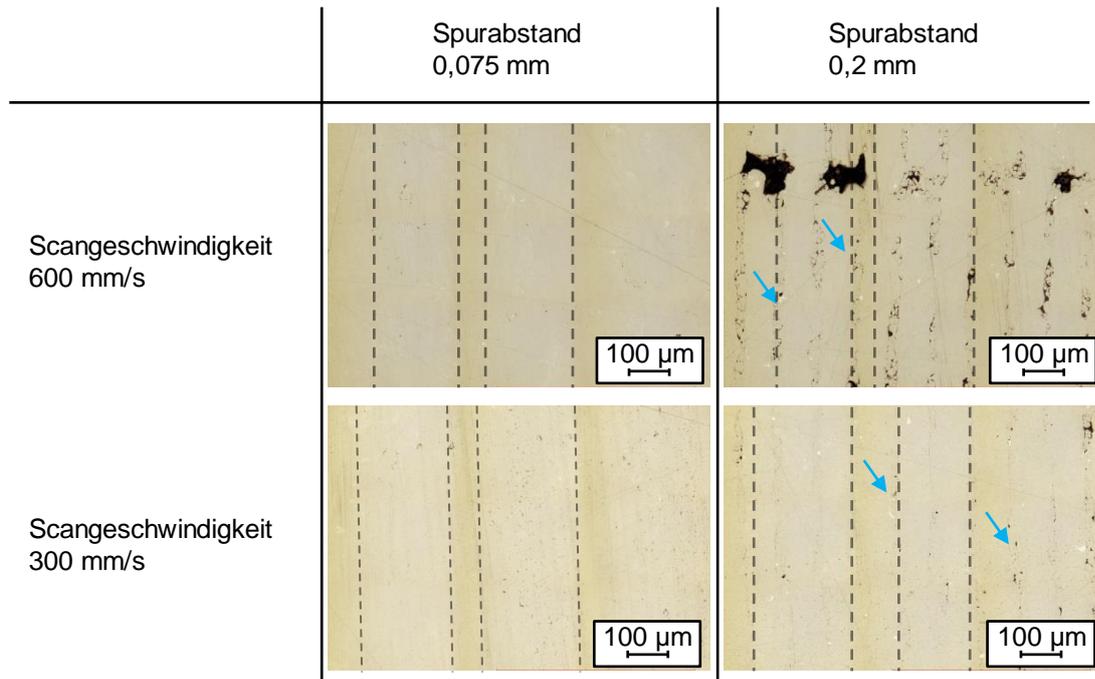


Abbildung 6-5: Mikroskopaufnahmen von geschliffenen Probekörpern aus der Kupferlegierung CW106C mit unterschiedlichen Belichtungs-geschwindigkeiten und Spurabständen. Fehlstellen infolge ei-nes zu großen Spurabstands sind mit blauen Pfeilen markiert. Die gestrichelten Linien deuten den Verlauf der Schmelzbahnen an.

6.1.2 Makroskopische Untersuchungen

Die Analyse der Effekte auf makroskopischer Ebene erfolgt anhand von 2-D-Mul-timaterialproben. Hierzu wurden Würfel aus Werkzeugstahl 1.2709 und der Kup-ferlegierung CW106C mit einem sowie zwei Materialwechsel in Aufbaurichtung gefertigt. Der unterste Bereich hat eine Höhe von 6 mm und die darauffolgenden von jeweils 3 mm. Anhand dieser Proben wird der Einfluss der Werkstoffabfolge und von Prozessunterbrechungen analysiert.

In diesem Kontext wird eine Prozessunterbrechung als ein Stoppen des Prozesses, Fluten der Prozesskammer mit Sauerstoff und Öffnen der Prozesskammer verstan-den. Bei den Untersuchungen der Werkstoffabfolge werden Proben mit einem und zwei Werkstoffübergängen gefertigt, jeweils einmal mit und einmal ohne Unter-

brechung. Der Einfluss der Fertigungsabfolge wurde zum einen durch eine Variation des Grundmaterials erreicht, zum anderen durch die Anzahl der Schichten. So wurden Proben mit den Materialabfolgen

- Kupferlegierung CW106C → Stahl 1.2709,
- Kupferlegierung CW106C → Stahl 1.2709 → Kupferlegierung CW106C,
- Stahl 1.2709 → Kupferlegierung CW106C und
- Stahl 1.2709 → Kupferlegierung CW106C → Stahl 1.2709

hergestellt. Alle Proben wurden zur statistischen Absicherung zwei Mal gebaut. Der vollständige Versuchsplan kann Tabelle 11-4 im Anhang entnommen werden.

Die Proben wurde mittels bildgebender Verfahren analysiert sowie deren relative Dichte mittels Binarisierung von Mikroskopiebildern bestimmt. Bei allen Proben konnten in den jeweiligen werkstoffspezifischen Bereichen relative Dichten entsprechend der Werte der Monomaterialien erreicht werden. Abhängig von der Abfolge des Materials treten jedoch Unterschiede im Übergangsbereich auf, wie in Abbildung 6-6 exemplarisch an einer Probe mit der Aufbaureihenfolge Stahl - Kupferlegierung - Stahl zu sehen ist.

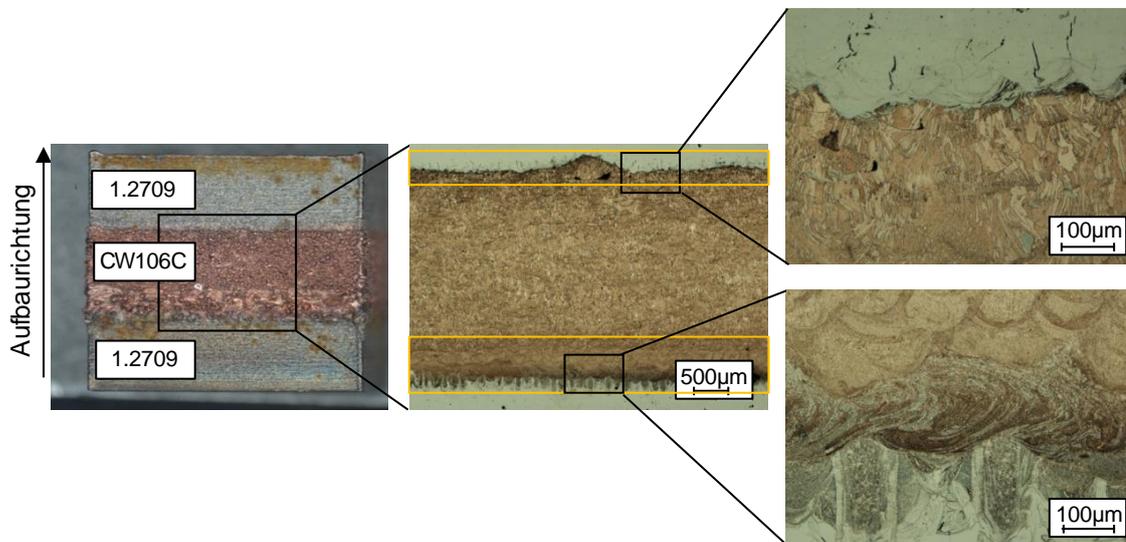


Abbildung 6-6: Geätzte Mikroskopieaufnahmen von 2-D-Multimaterialbauteilen in Aufbaurichtung mit Baureihenfolge Stahl 1.2709 – Kupferlegierung CW106C – Stahl 1.2709. Der orange eingerahmte Bereich stellt den Materialübergangsbereich dar.

Während sich bei einem Werkstoffwechsel von Stahl 1.2709 auf die Kupferlegierung CW106C beide Werkstoffbereiche miteinander vermischen, tritt dies im um-

6.1 Identifikation von Einflussgrößen

gekehrten Fall nicht auf. Hier sind deutlich die Schweißbahnen zu erkennen, während diese bei fortgeschrittener Bauhöhe in derselben Probe nicht mehr sichtbar sind. Zusätzlich sind bei zweit genanntem Werkstoffübergang deutlich mehr Risse im Übergansbereich zu erkennen (jeweils gelb markierter Bereich in Abbildung 6-6). Dieses Ergebnis tritt bei allen Probekörpern, unabhängig von der Anzahl der Materialbereiche oder der Aufbaureihenfolge, auf (vgl. Abbildung 6-7).

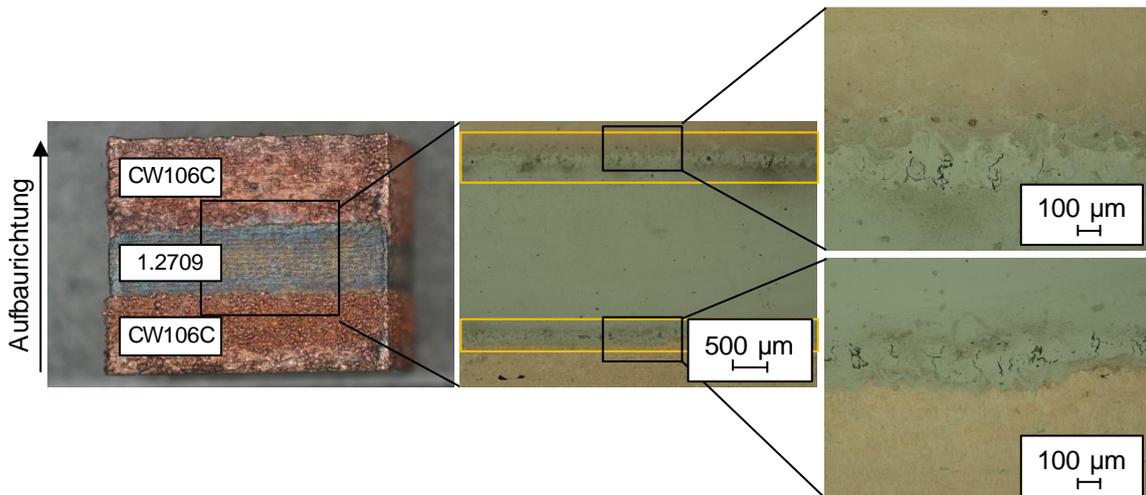


Abbildung 6-7: Mikroskopieaufnahmen von 2-D-Multimaterialbauteilen in Aufbauichtung mit Baureihenfolge Kupferlegierung CW106C – Stahl 1.2709 – CW106C. Der orange eingerahmte Bereich stellt den Materialübergangsbereich dar.

Dieses Erscheinungsbild ist unabhängig von der Anzahl der Materialwechsel und kann mehrere Ursachen haben. Zum einen ist die Energie zum Verarbeiten der Kupferlegierung CW106C um 40,5 % höher als die zum Aufschmelzen von Stahl 1.2709 (vgl. Abschnitt 6.1.1). Das hat in Verbindung mit der hohen Wärmeleitfähigkeit dieses Werkstoffs zur Folge, dass bei einem nachgelagerten Aufschmelzen auch Stahl mitverflüssigt wird. Somit können sich die beiden Materialien in der Schmelzphase vermischen. Darüber hinaus hat der kupferbasierte Werkstoff einen niedrigeren Schmelzpunkt. Dadurch könnte er sich nach einer Verfestigung des Stahlwerkstoffs noch in ggf. entstandene Spannungsrisse einlagern und hierdurch verschließen. Dies kann auch anhand des Phasendiagramms des binären Werkstoffsystems aus Eisen und Kupfer gesehen werden (NATIONAL PHYSIK LABORATORY 2012). Bis zu einer Temperatur von 1371 K erstarrt erst ein Teil der Schmelze. Erst wenn diese Temperatur unterschritten wird, verfestigt sich die komplette Schmelze zu zwei kubisch flächenzentrierten Kristallen (KFZ: Kubisch

Flächen zentriert) und bei 1116 K zu kubisch körperzentrierten Kristallen (KRZ: Kubisch Raum zentriert) und kubisch flächenzentrierten Kristallen (siehe Abbildung 6-8).

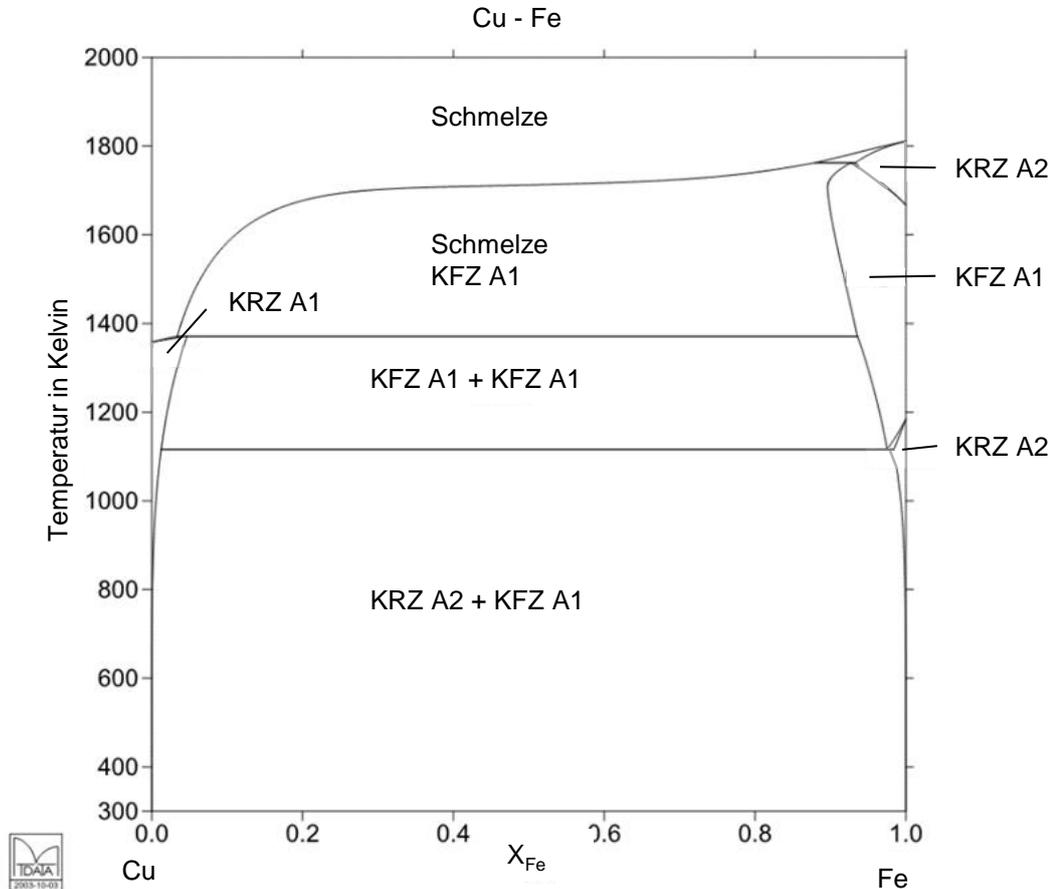


Abbildung 6-8: Phasendiagramm des binären Systems Eisen (Fe) und Kupfer (Cu) (NATIONAL PHYSIK LABRATORY 2012)

Bei umgekehrter Aufbaureihenfolge wird durch die verfestigte Kupferlegierung die eingebrachte Energie beim Verfestigen des Stahlwerkstoffs aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit schneller weggeleitet. Dies führt im Übergangsbereich zu einem größeren Temperaturgradienten im Vergleich sowohl zur Monomaterialverarbeitung des Stahlwerkstoffs, als auch zur Herstellung des Materialübergangs von Stahl auf die Kupferlegierung. Hierdurch entstehen Spannungen im Stahlbereich, die eine Rissbildung bewirken. Diese Effekte wurden auch von MAI & SPOWAGE (2004), SUN & ION (1995) und CHEN ET AL. (2013) für das Laserstrahlschweißen von Stahl und Kupfer beobachtet. Im Bereich des Laserstrahl-

schmelzens wurde dieser Effekt von BEAL (2005) für den gradierten Werkstoffübergang aus Warmarbeitsstahl 1.2344 und Kupfer sowie von LIU ET AL. (2014) für die Werkstoffkombination 1.4404 und die Kupferlegierung C18400 bestätigt.

Eine weitere Ursache für die Rissbildung können die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen sein. Beim Aufschmelzen der Pulverschicht werden auch darunterliegende Schichten noch einmal mit aufgeschmolzen. Hiernach kühlen beide Schichten ab. Ist nun die Wärmeausdehnung der einen Schicht größer als die der anderen, schrumpfen die beiden Schichten unterschiedlich stark, was zu Spannungen im Übergangsbereich führt. Überschreiten die Spannungen die Zugfestigkeitsgrenze R_m des Werkstoffs, kommt es zur Rissbildung (vgl. Abschnitt 2.2.1). Zum Aufschmelzen von Stahl sind höhere Temperaturen notwendig. Somit treten auch bei dieser Verfestigung größere thermisch bedingte Größenänderungen auf. Dadurch entstehen größere Spannungen, was die Bildung von Rissen weiter unterstützt (siehe Abbildung 6-9).

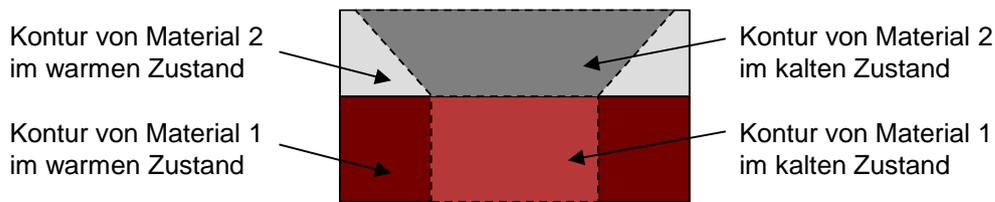


Abbildung 6-9: Einfluss unterschiedlicher Wärmeausdehnungen auf die Rissentstehung in Bauteilen

Weitere Faktoren können Prozessunterbrechungen sowie das Öffnen der Prozesskammer zum Wechseln der Pulverwerkstoffe sein. Zum einen kühlen die Bauteile hierdurch ab, was zu veränderten Prozessbedingungen führt. Zum anderen kann durch das Öffnen der Prozesskammer Sauerstoff hineingelangen, der mit den obersten Schichten des Bauteils reagiert und somit ebenfalls zu veränderten Prozessbedingungen führt.

Der Einfluss der Aufbaureihenfolge kann auch anhand der Analyse der Härteverläufe in Abbildung 6-10 abgeleitet werden.

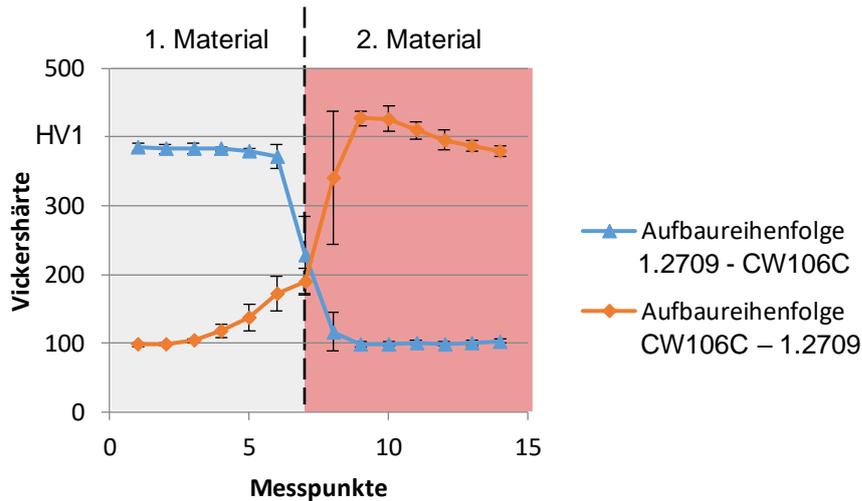


Abbildung 6-10: Darstellung des Härteverlaufes bei 2-D-Multimaterialproben mit unterschiedlicher Aufbaureihenfolge

Abhängig von der Aufbaureihenfolge ergeben sich unterschiedliche Härteverläufe entlang der Aufbaurichtung eines Probekörpers. Folgt auf einen Kupferbereich der Werkzeugstahl, ist bereits früher eine Steigerung der Härte im Kupferbereich zu beobachten. Bei umgekehrter Fertigungsreihenfolge tritt dies nicht auf. Darüber hinaus ist eine erhöhte Härte im Stahlbereich festzustellen, wenn dieser auf die Kupferlegierung folgt. Der zweitgenannte Effekt kann auf erhöhte Eigenspannungen im Bauteil zurückgeführt werden, welche durch einen erhöhten Temperaturgradienten hervorgerufen werden können. Eine weitere Ursache ist der Wärmeeinfluss infolge des Aufschmelzvorgangs. Die eingebrachte Energie zum Aufschmelzen des Werkzeugstahls ist zwar zu gering, um die Kupferlegierung zu verflüssigen, kann allerdings ausreichend hoch sein, um die Bildung von Ausscheidungen in den oberen Schichten der Kupferlegierung hervorzurufen. Dieser Vorgang erfolgt bei 425 °C bis 500 °C (DEUTSCHES KUPFERINSTITUT 2005). Da die Schmelztemperatur des Werkzeugstahls deutlich über diesem Bereich liegt, kann davon ausgegangen werden, dass auch die darunterliegenden Schichten bis oder sogar über diesen Bereich erwärmt werden und somit der Ausscheidungsprozess und hierdurch die Härtesteigerung erfolgt. Ein weiterer möglicher Grund könnte in der Bildung von Oxiden in den oberen Bereichen der Proben liegen. Da allerdings im Rahmen der erfolgten Versuchsreihe Probekörper sowohl mit als auch ohne Prozessunterbrechung hergestellt wurden und hierbei keine signifikanten Unterschiede in den Härteverläufen festgestellt werden können, kann dies ausgeschlossen werden.

Abbildung 6-11 zeigt Bilder von Probekörpern, die einmal mit und einmal ohne Prozessunterbrechung gefertigt wurden. Es fällt auf, dass vor allem im Stahlbereich bei der Probe mit Prozessunterbrechung deutliche Verfärbungen an der Außenseite auftreten. Diese können auf einen höheren Sauerstoffgehalt in der Prozesskammer und somit auf eine Oxidation des Werkstoffs zurückgeführt werden. Im Schliffbild zeigen sich jedoch keine Unterschiede. Um im Fertigungsprozess eine Oxidation der Grenzflächen zu vermeiden, was sich negativ auf die Verbindung der beiden Werkstoffe auswirken kann, sollten Prozessunterbrechungen vermieden werden.

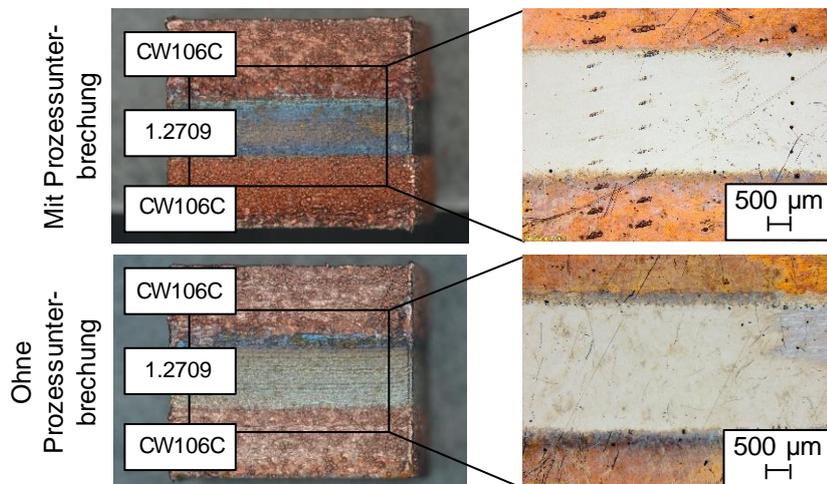


Abbildung 6-11: Einfluss von Prozessunterbrechungen auf die Prozessführung

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass vor allem die Werkstoffabfolge Einfluss auf den Werkstoffübergang hat. Die Anzahl an Werkstoffwechseln sowie ein Einfluss von Prozessunterbrechungen auf die Verbindung des Werkzeugstahls und der Kupferlegierung kann nicht beobachtet werden.

6.1.3 Mikroskopische Untersuchungen

Die makroskopischen Untersuchungen zeigen ein Vermischen der Schmelze bei einer Aufbaureihenfolge Stahl 1.2709 und Kupferlegierung CW106C. Um diesen Effekt zu simulieren, wurden Probekörper aus verschiedenen Pulvermischungen des Stahlwerkstoffs und der Kupferlegierung gefertigt.

Hierzu wurde eine Pulvermischung aus 25 Gew.% Werkzeugstahl und 75 Gew.% der Kupferlegierung sowie mit umgekehrtem Mischungsverhältnis und einer Probe mit gleichen Massenanteilen an Kupferlegierung CW106C und Stahl 1.2709

hergestellt. Diese Verteilungen wurden gewählt, um den Einfluss beider Werkstoffe auf die Verarbeitbarkeit im Prozess in unterschiedlichen Bereichen des Bauteils simulieren zu können. Unter Verwendung dieser Mischpulver wurde eine Parameterstudie zur Optimierung der relativen Dichte durchgeführt. Ziel war es, jeweils einen Parametersatz zu identifizieren, mit welchem Bauteile mit mehr als 99 % relativer Dichte sowie ohne Bindefehler oder Risse hergestellt werden können. Zur Identifikation eines möglichen Parametersatzes wird die Volumenenergie zur Verarbeitung des Werkzeugstahls und der Kupferlegierung linear interpoliert. Der vollständige Versuchsplan kann Tabelle 11-10 des Anhangs 11.4 entnommen werden.

Auf Basis der hergestellten Proben kann der Einfluss des zweiten Werkstoffs auf die benötigte Volumenenergie zur Herstellung von Proben mit den genannten Eigenschaften bestimmt werden. Der Zusammenhang von Volumenenergie und Massenprozentanteil der Kupferlegierung ist in Abbildung 6-12 zu sehen.

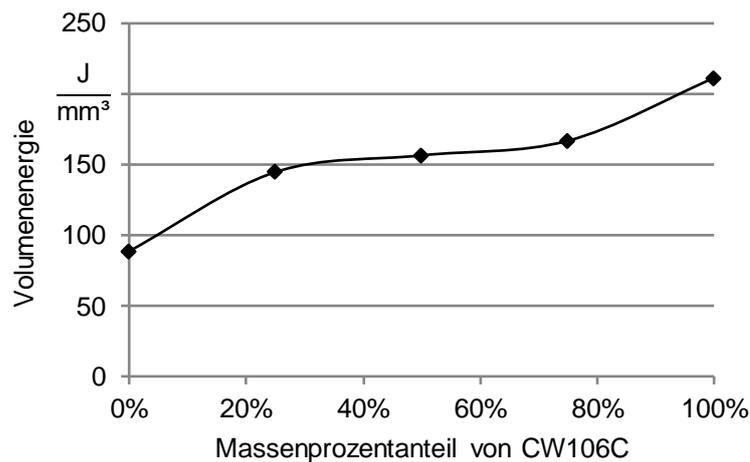


Abbildung 6-12: Benötigte Energiemenge zur Herstellung von Probekörpern aus Pulvermischungen mit unterschiedlichen Anteilen von Werkzeugstahl 1.2709 und Kupferlegierung CW106C

Die benötigte Energie für alle Pulvermischungen liegt zwischen der Volumenenergie der reinen Legierungen. Dies lässt sich durch die veränderten optischen Eigenschaften des Werkstoffgemischs erklären. Eine Beimischung von 25 Gew.% des Stahlwerkstoffs bewirkt bereits eine Reduzierung der benötigten Energie um 16 %. Bei einer weiteren Erhöhung des Werkzeugstahlanteils kann die Volumenenergie nur sehr wenig weiter gesenkt werden. Dies kann auf die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der beiden Werkstoffe zurückgeführt werden. Die benötigte Volumenenergie zum Aufschmelzen der Kupferlegierung liegt deutlich über der des

6.1 Identifikation von Einflussgrößen

Stahlwerkstoffs, da die eingebrachte Wärmeenergie wesentlich schneller weggeleitet wird. Soll der Schmelzpunkt erreicht werden, ist dadurch eine höhere Volumenenergie notwendig (vgl. auch Abschnitt 3.1.2).

Bei der Verarbeitung der Materialmischungen können auch in den Schliffbildern Unterschiede gesehen werden (siehe Abbildung 6-13). So verändert sich die Farbe bei steigendem Kupferanteil mehr Richtung rot-braun. Beide Werkstoffe liegen gleichmäßig verteilt vor.

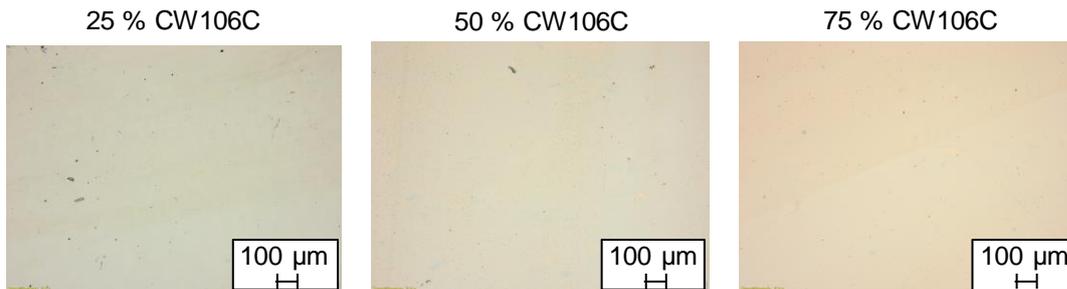


Abbildung 6-13: Werkstoffverteilung in Probekörpern gefertigt aus unterschiedlichen Materialmischungen

Die Probekörper weisen bei keinem Mischverhältnis Risse auf. Diese wurden unter anderem von LIU ET AL. (2014) und BEAL ET AL. (2006) beim Schweißen von Edelstahl und Werkzeugstahl H13 jeweils mit Kupfer beobachtet. Bekräftigt wird die Erwartung von Rissen durch SCHULZE (2010). Infolge unterschiedlicher Schmelztemperaturen lagert sich der Werkstoff mit dem niedrigeren Schmelzpunkt an den Korngrenzen des Werkstoffs mit der höheren Schmelztemperatur ab. Die Volumenkontraktion des niedrig schmelzenden Werkstoffs führt dann zu thermischen Spannungen, welche Risse hervorrufen können. In Abbildung 6-13 sind keine Risse zu erkennen. Da jede Stelle mehrfach aufgeschmolzen wird, kann eine homogene Verteilung der Materialien im Bauteil erfolgen. Heißrisse, welche nach dem ersten Aufschmelzen entstanden sein könnten, können sich durch das mehrfache Aufschmelzen wieder schließen. Darüber hinaus, wurden Parameter mit angepasster Volumenenergie verwendet, wodurch die erreichte Schmelztemperatur ggf. herabgesetzt wurde und der Temperaturgradient somit geringer ist. Damit werden innere Spannungen reduziert und es entstehen keine Risse.

6.1.4 Fazit

Die Verarbeitung von unterschiedlichen metallischen Werkstoffen beeinflusst den LBM-Herstellungsprozess, da die Prozessparameter von den optischen, thermischen und thermo-mechanischen Eigenschaften des Materials abhängen. Für die Verarbeitung des Monomaterials Werkzeugstahl 1.2709 und der Kupferlegierung CW106C sind die benötigten Volumenenergien zum Aufschmelzen sehr unterschiedlich. Aufgrund der geringen Absorptionsrate der elektromagnetischen Energie und der hohen Wärmeleitfähigkeit benötigt die Kupferlegierung trotz niedrigerem Schmelzpunkt mehr Energie, um aufgeschmolzen zu werden.

Dies wirkt sich auch auf die Verbindung der beiden Werkstoffe aus, wie sich bei den makroskopischen Untersuchungen zeigte. Wird die Kupferlegierung auf den Werkzeugstahl aufgebaut, werden bereits verfestigte Materialschichten des Werkzeugstahls mit aufgeschmolzen. Es findet eine Vermischung beider Werkstoffe in der Schmelzphase statt. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Kupferlegierung wird die Schmelztemperatur des Werkzeugstahls erreicht, wodurch die Entstehung eines Schmelzbades aus Kupferlegierung und Werkzeugstahl möglich ist.

Bei umgekehrter Aufbaureihenfolge ist dies nicht der Fall. Die Wärmeenergie, die beim Aufschmelzen des Werkzeugstahls bis zum Bereich der Kupferlegierung weitergeleitet wird, ist nicht ausreichend, um den Werkstoff in die Schmelzphase zu überführen. Es kann keine Verbindung der Werkstoffe in der Schmelzphase erfolgen. Jedoch muss beachtet werden, dass die induzierte Wärmeenergie ausreichend hoch ist, um einen Wärmenachbehandlungseffekt zu erzielen, was zu höheren Härten im übergangsnahen Bereich der Kupferlegierung führt. Gleichzeitig steigt der Temperaturgradient im kupfernahen Bereich aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit. Hierdurch entstehen zu hohe Eigenspannungen im Werkzeugstahl. Als Folge treten Risse in Aufbaurichtung auf.

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten den Einfluss auf die benötigte Volumenenergie zum Aufschmelzen der Materialmischungen. Durch die Vermischung senkt sich der Schmelzpunkt im Vergleich zur Kupferlegierung ab. Hierdurch senkt sich auch der Temperaturgradient und es entstehen keine Heißrisse.

Die Erkenntnisse werden nun auf den Multimaterialprozess übertragen. Um eine Verbindung der beiden Werkstoffe auch in der Fertigungsebene herzustellen, müssen Steuergrößen identifiziert werden, damit die auftretenden Effekte gezielt beeinflusst werden können.

6.2 Identifikation von Steuergrößen

Wie aus vorausgegangenem Abschnitt ersichtlich wurde, beeinflussen die verschiedenen Materialeigenschaften den Laserstrahlschmelzprozess. Damit die Steuergrößen identifiziert werden können, wurden die makroskopischen Untersuchungen auf den 3-D-Multimaterialprozess übertragen. Die Aufbaureihenfolge hat die zeitliche Abfolge des Fertigungsprozesses bestimmt. Im 3-D-Multimaterialprozess kann dies durch die Belichtungsreihenfolge erzielt werden. Darüber hinaus wurde auch der Einfluss der Materialreihenfolge betrachtet. Dies ist äquivalent zur geometrischen Anordnung der Werkstoffe.

Ein weiterer Effekt, der bei den makroskopischen Untersuchungen deutlich wurde, ist die Vermischung der beiden Werkstoffbereiche durch das Aufschmelzen. Gleichzeitig zeigten die mikroskopischen Untersuchungen, dass ein Vermischen der beiden Werkstoffe zu veränderten Prozessparametern führt. Daher wird untersucht, ob ein Übergangsbereich zwischen den beiden werkstoffspezifischen Bereichen notwendig ist, und falls ja, wie groß dieser sein muss und wie dieser gestaltet werden kann.

Somit werden im Folgenden diese Prozessparameter näher untersucht:

- die geometrische Anordnung,
- die Belichtungsreihenfolge,
- das Belichtungsmuster und
- die Größe des Übergangsbereichs.

Zum besseren Verständnis werden diese Steuergrößen im Folgenden kurz erläutert.

Die *geometrische Anordnung* beschreibt die relative Lage der werkstoffspezifischen Bereiche innerhalb eines Bauteils zueinander. Es kann beispielsweise einmal der Kern aus Material A und die Hülle aus Werkstoff B bestehen, während die Verteilung das andere Mal umgekehrt ist. Beispielhaft ist dies in Abbildung 6-14 dargestellt.

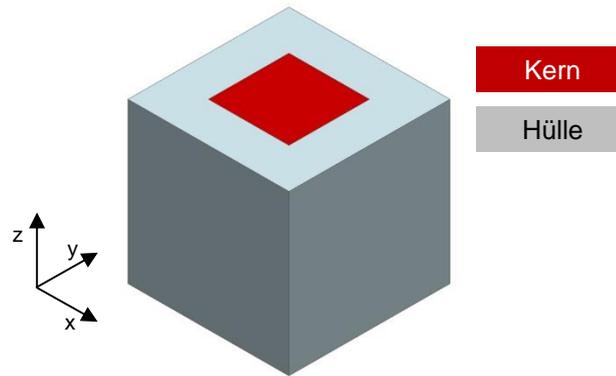


Abbildung 6-14: Geometrische Anordnung der werkstoffspezifischen Bereiche in einem Multimaterialbauteil

Die *Belichtungsreihenfolge* bezeichnet die zeitliche Abfolge, mit der die unterschiedlichen Bereiche eines Multimaterialbauteils in einer Schicht belichtet werden.

Für Multimaterialproben, die aus zwei Werkstoffen bestehen, können drei verschiedene Bereiche definiert werden (vgl. Abbildung 6-15). Die ersten zwei Bereiche A und B bestehen aus jeweils einem Werkstoff und weisen somit die physikalischen Eigenschaften des entsprechenden Werkstoffs auf. Der dritte Bereich ist der Übergangsbereich C. In diesem Bereich liegen beide Werkstoffe vor, sodass die physikalischen Eigenschaften beider Werkstoffe den Fertigungsprozess beeinflussen.

Die *Größe des Übergangsbereichs* d beschreibt, welche Ausmaße der Übergangsbereich zwischen zwei Werkstoffen hat. In Abbildung 6-15 ist dieser Bereich symmetrisch zwischen beiden werkstoffspezifischen Bereichen dargestellt. Je nach Werkstoffkombination kann es allerdings auch vorkommen, dass der Einflussbereich des jeweils benachbarten Werkstoffs auf den Werkstoff größer bzw. kleiner ist und somit der Übergangsbereich der entsprechenden Seite größer bzw. kleiner ist.

Als *Belichtungsmuster* wird in dieser Arbeit die Integration von geometrischen Merkmalen im Übergangsbereich verstanden. Dies wird durchgeführt, um unterschiedliche Strategien zur Materialverbindung zu analysieren. Hierzu wurden exemplarisch die in Abbildung 6-19 dargestellten Belichtungsstrategien umgesetzt. Zur Erzeugung der Verzahnung werden im Übergangsbereich unterschiedlich lange Streifen der beiden Werkstoffe verfestigt. Zur Herstellung des Schachmusters werden Quadrate gleicher Größe versetzt belichtet. In den beiden Fällen

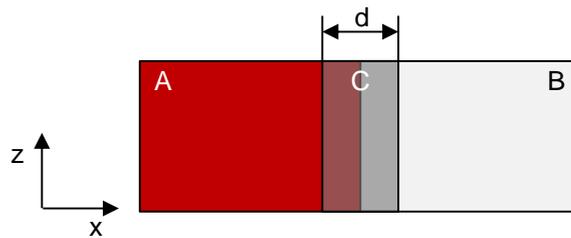


Abbildung 6-15: Aufteilung der Bereiche eines Multimaterialbauteils mit einem Übergangsbereich C der Größe d zwischen zwei Werkstoffbereichen A und B

Schachbrett und Verzahnung kamen entsprechend dem Farbschema die Prozessparametersätze der beteiligten Werkstoffe zum Einsatz.

Ein Bereich, der gleichmäßig über beide Bereiche verteilt ist, wird mithilfe der Brücke umgesetzt. Für deren Fertigung kommt ein extra Parametersatz zum Einsatz. Das letzte Belichtungsmuster umrahmt den innenliegenden Kern. Zur Erzeugung des Rahmens kam der Parameter des innenliegenden Werkstoffs zum Einsatz.

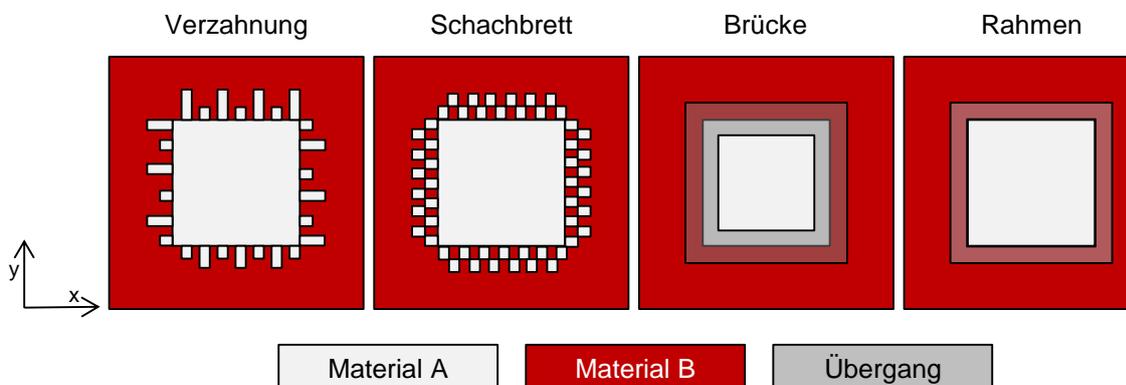


Abbildung 6-16: Betrachtete Belichtungsmuster zur Herstellung von 3-D-Multimaterialprobekörper. Die Farben repräsentieren unterschiedliche Probekörperbereiche

6.3 Analyse von Steuergrößen

Nachdem Einflussgrößen auf den Multimaterialfertigungsprozess identifiziert wurden, gilt es nun, Steuergrößen zu finden, mit welchen die Auswirkungen im Fertigungsprozess auf die Qualität von Bauteilen kontrolliert werden können.

Zur Analyse des Einflusses der Steuergrößen wurden Versuchspläne erstellt und die Auswirkungen anhand der Bauteilqualität der Probekörper bestimmt. Der vollständige Versuchsplan zur Fertigung der 3-D-Multimaterialproben aus der Kupferlegierung CW106C und Werkzeugstahl 1.2709 kann Tabelle 11-6 des Anhangs entnommen werden. Mit allen untersuchten Parametersätzen wurden mehrere Probekörper über mehrere Fertigungsprozesse verteilt hergestellt. Zur Herstellung der materialspezifischen Bereiche aus Werkzeugstahl 1.2709 und der Kupferlegierung CW106C kommen die im Rahmen der Validierung (Abschnitt 6.1.1) identifizierten Prozessparameter zum Einsatz.

In den folgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Steuergrößen einzeln betrachtet. Im Anschluss werden die Ergebnisse diskutiert und Rückschlüsse auf mögliche Prozessparameter getroffen.

6.3.1 Geometrische Anordnung

6.3.1.1 Vorgehen

Im ersten Schritt wurde die geometrische Anordnung untersucht. Dafür wurde nur der Werkstoff in Hülle und Kern variiert. Die übrigen möglichen Steuergrößen wurden konstant gehalten. Alle Proben haben, analog zum Spurüberlapp, einen Übergangsbereich in Form einer Brücke von 0,2 mm. Dieser wurde mit den Parametern des zweiten Werkstoffs belichtet (siehe Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: Steuergrößen zur Analyse des Einflusses der Belichtungsreihenfolge

Hülle	Kern	Größe Übergangsbereich	Belichtungsreihenfolge	Belichtungsstrategie
Werkzeugstahl 1.2709	Kupferlegierung CW106C	0,2 mm	1) Hülle 2) Übergang 3) Kern	Brücke
Kupferlegierung CW106C	Werkzeugstahl 1.2709	0,2 mm	1) Kern 2) Übergang 3) Hülle	Brücke

6.3.1.2 Analyse der Bauteilqualität

Anhand von Abbildung 6-17 ist festzustellen, dass die räumliche Anordnung keinen Einfluss auf den Fertigungsprozess hat, da keine Risse oder Bindefehler in den Schliffbildern zu erkennen sind. Die Analyse der relativen Dichten in den verschiedenen werkstoffspezifischen Bereichen bestätigt den visuellen Eindruck der Bauteilgüte. Für die Variante mit einem Stahlkern beträgt die rel. Dichte $0,15 \% \pm \begin{matrix} 0,53 \\ 0,14 \end{matrix}$ und für einen Kern aus der Kupferlegierung $0,46 \% \pm \begin{matrix} 1,11 \\ 0,43 \end{matrix}$. Das entspricht im Mittel einer relativen Dichte von mehr als 99 %.

6.3.1.3 Diskussion

Infolge der räumlichen Anordnung konnte kein Einfluss auf die relative Dichte oder das Auftreten von Rissen festgestellt werden. Ursächlich hierfür ist die gleichbleibende Kontaktfläche der beiden Werkstoffe. Hierdurch wird der Wärmefluss im Fertigungsprozess zwischen den beiden Werkstoffen bei gleicher Temperaturdifferenz nicht beeinflusst und wirkt sich somit auch nicht auf den Prozess aus.

Aufgrund dieser Erkenntnis werden im Folgenden alle Untersuchungen anhand einer geometrischen Anordnung durchgeführt. Auf diese Weise kann der Versuchsumfang um die Hälfte der Versuche reduziert werden.

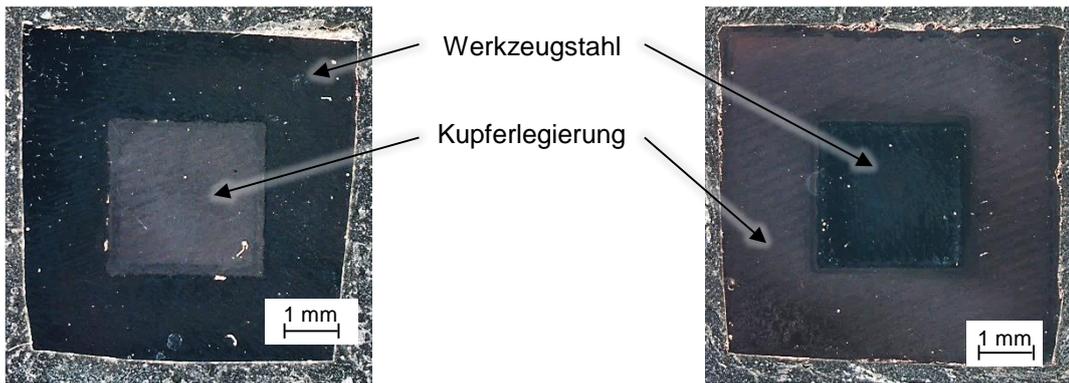


Abbildung 6-17: Im Multimaterialprozess gefertigte Probekörper aus Kupferlegierung CW106C und Stahl 1.2709 mit 0,2 mm Übergangsbereich und unterschiedlicher räumlicher Anordnung. Links: Kern aus Kupferlegierung CW106C und Hülle aus Werkzeugstahl 1.2709, rechts: Kern aus Werkzeugstahl 1.2709 und Hülle aus CW106C

6.3.2 Belichtungsreihenfolge

Die makroskopischen Untersuchungen zeigen einen großen Einfluss der Belichtungsreihenfolge. Daher wird diese als Zweites untersucht.

Diese Analyse erfolgt in zwei Stufen. In der ersten wird der Einfluss der Belichtungsreihenfolge der Werkstoffe betrachtet. In der zweiten erfolgen Untersuchungen unter Berücksichtigung des Übergangsbereichs zwischen den beiden werkstoffspezifischen Bereichen.

6.3.2.1 Analyse der Bauteilqualität unter Berücksichtigung der Werkstoffreihenfolge

Die Werkstoffreihenfolge wurde anhand von Proben mit 0,2 mm Übergangsbereich durchgeführt. Von diesen Proben sind Schliffbilder erstellt worden und mittels optischer Verfahren analysiert worden. Repräsentative Schliffbilder sind in Abbildung 6-18 zu sehen.

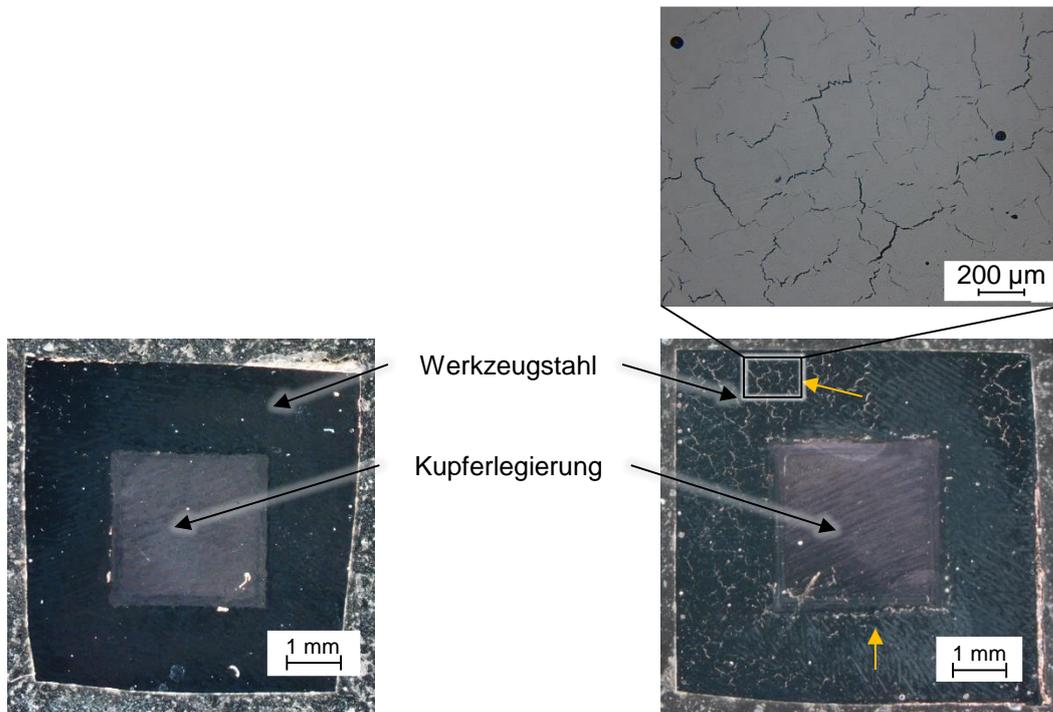


Abbildung 6-18: Schliffbilder einer Fertigungsebene von zwei gefertigten Multimaterialproben aus der Kupferlegierung CW106C und Stahl 1.2709 mit unterschiedlicher Belichtungsreihenfolge. Links: Stahl 1.2709 → CW106C, rechts: Kupferlegierung CW106C → Stahl 1.2709; gelbe Pfeile deuten auf Risse

Ähnlich wie bei den Schliffbildern des 2-D-Multimaterialübergangs sind je nach Belichtungsreihenfolge Unterschiede in den Schliffbildern der Bauteile zu erkennen. Die Probekörper, bei denen erst die Kupferlegierung CW106C und anschließend Stahl 1.2709 belichtet wurde, zeigen eine starke Rissbildung sowohl im Stahlbereich als auch im Übergangsbereich parallel zum Materialwechsel. Diese sind in Abbildung 6-18 rechts mit gelben Pfeilen markiert. Bei umgekehrter Belichtungsreihenfolge treten hingegen keine Risse auf.

6.3.2.2 Analyse der Bauteilqualität unter Berücksichtigung der Bereichsreihenfolge

Aufgrund dieser Beobachtungen wurde für die folgenden Versuche festgelegt, den Stahlwerkstoff als Erstes zu verfestigen. Mit dieser Voraussetzung werden drei weitere Bereichsreihenfolgen untersucht, entsprechend der Reihenfolge aus Tabelle 6-4.

Tabelle 6-4: Untersuchte Bereichsreihenfolgen zur Bestimmung des Einflusses der Belichtungsreihenfolge

Nummerierung	1. Belichtung	2. Belichtung	3. Belichtung
a)	Werkzeugstahl 1.2709	Übergangsbereich und Kupferlegie- rung CW106C	Kupferlegierung CW106C
b)	Werkzeugstahl 1.2709	Übergangsbereich	Kupferlegierung CW106C
c)	Werkzeugstahl 1.2709	Kupferlegierung CW106C	Übergangsbereich

Für die Bereichsreihenfolge a) wurde für den Übergangsbereich der gleiche Parametersatz wie für die Kupferlegierung verwendet. In den Fällen b) und c) wurde für den Übergangsbereich der Parametersatz, der in Abschnitt 6.1.2 für eine Materialmischung im Verhältnis 1:1 bestimmt wurde, eingesetzt.

Im Rahmen dieser Betrachtungen wurde auch die Größe des Übergangsbereichs auf den Stufen 0,1 mm, 0,4 mm und 0,7 mm variiert. Schliffbilder dieser Untersuchungen sind beispielhaft in Abbildung 6-19 zu sehen.

Anhand der Aufnahmen kann festgestellt werden, dass der Einsatz der Belichtungsstrategie a) viele Fehlstellen im Übergangsbereich entstehen lässt, während bei Verwendung eines separaten Parametersatzes für den Übergangsbereich diese weniger auftreten.

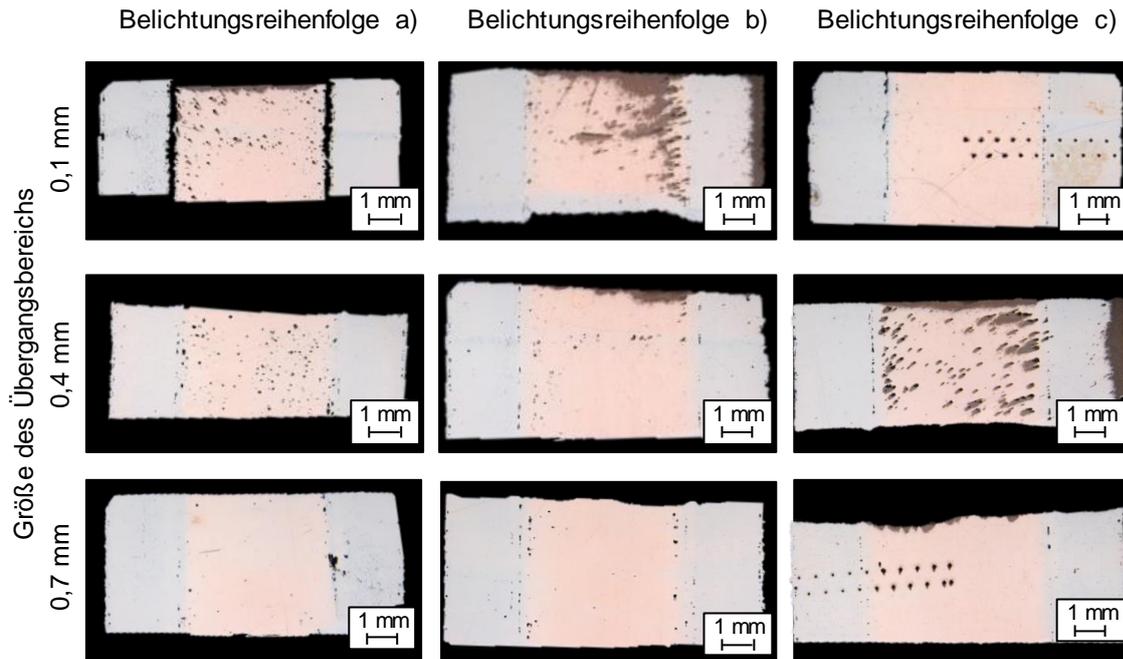


Abbildung 6-19: Schliffbilder in Aufbaurichtung von Probekörpern mit unterschiedlicher Belichtungsreihenfolge und unterschiedlich großem Übergangsbereich. Jeweils außen Werkzeugstahl und innen Kupferlegierung CW106C

Der Einfluss der Belichtungsreihenfolge kann auch bei der Bestimmung der relativen Dichte der Probekörper gesehen werden. Insbesondere bei kleinen Übergangsbereichen kann der Unterschied zwischen den Belichtungsstrategien a) und b) bzw. c) gesehen werden. Für die Belichtungsstrategien mit einem separaten Parametersatz werden bei allen Probekörpern relative Dichten erreicht, die größer als 98 % sind (siehe Abbildung 6-20). Auch treten bei diesen Strategien geringere Schwankungen der Ergebnisse auf. Wird die Belichtungsstrategie c) verwendet und liegt die Größe des Übergangsbereichs bei 0,4 mm bzw. 0,7 mm, werden relative Dichten von mehr als 99 % erreicht.

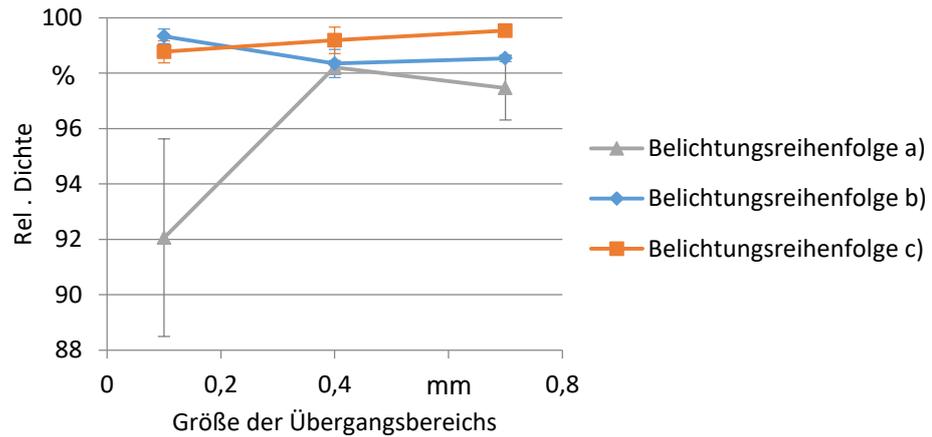


Abbildung 6-20: Darstellung des Einflusses der Größe des Übergangsbereichs auf die relative Dichte des Übergangsbereichs bei der Fertigung von Probekörpern aus Kupferlegierung CW106C und Stahl 1.2709

6.3.2.3 Diskussion

Der Einfluss der unterschiedlichen Belichtungsreihenfolgen kann auf die thermischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe zurückgeführt werden. Diese spielen im Laserstrahlschmelzprozess eine wichtige Rolle (vgl. Abschnitt 2.1). Sie beeinflussen beispielsweise, wie schnell Wärme von einem Ort weggeleitet wird. Bei diskreten Werkstoffübergängen verändern sich die thermischen Eigenschaften von einem Ort zum anderen sprunghaft. Somit ist der Wärmefluss im Bauteil nicht mehr homogen, was den Fertigungsprozess beeinflusst.

Mit steigender Dichte des Werkstoffs erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit. Während das Pulver als thermischer Isolator wirkt und die Wärmeenergie somit nur sehr langsam weiterleitet, erfolgt dies vor allem durch die Kupferlegierung aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit schneller. Infolge des schnelleren Wegleitens der Wärmeenergie erhöht sich der Temperaturgradient im Bauteil. Dieser beeinflusst die Eigenspannungen im Bauteil infolge der erhöhten thermischen Spannungen. Diese Eigenspannungen können unter anderem zur Bildung von Rissen führen, wie bei den makroskopischen Untersuchungen (siehe Abschnitt 6.1.2) zur Belichtungsreihenfolge der Werkstoffe festgestellt wurde (ALKAHARI ET AL. 2012, KRUTH ET AL. 2012). Die Wärmeleitfähigkeit des Stahlwerkstoffs ist um ein Vielfaches kleiner als die der Kupferlegierung. Wird die Kupferlegierung als Erstes belichtet, liegt deren hohe Wärmeleitfähigkeit in der gerade zu erzeugenden

Schicht vor. Bei der nachfolgenden Verfestigung des Stahlwerkstoffs ist nun der Wärmefluss und somit auch der Temperaturgradient, insbesondere im Bereich nahe dem Materialwechsel größer, was zu größeren Spannungen im Bauteil führt.

Ein weiterer Grund, warum Risse im Stahlbereich auftreten, ist auf die höhere Zugfestigkeit des Werkstoffs zurückzuführen. MERCELIS & KRUTH (2006) konnten nachweisen, dass höhere Zugfestigkeiten zu höheren Eigenspannungen im Bauteil führen. Bei der betrachteten Werkstoffkombination von Werkzeugstahl und der Kupferlegierung weist der erstgenannte Werkstoff eine höhere Zugfestigkeit auf, weswegen die Risse im Stahlbereich und nicht im Kupferbereich auftreten. Entsprechendes wurde auch für 2-D-Multimaterialproben beobachtet (siehe Abschnitt 6.1.2).

Bei der Analyse zur Belichtungsreihenfolge der verschiedenen Bereiche treten weitere Effekte auf. Wird der Parametersatz zur Verarbeitung der Kupferlegierung für den Übergangsbereich verwendet, können vor allem runde Fehlstellen identifiziert werden (siehe Abbildung 6-21). Diese können beispielsweise infolge eines hohen Energieeintrags aufgrund eines Einschnürens der Kapillare entstehen. Da im Übergangsbereich bereits der Stahlwerkstoff verfestigt vorliegt, wird dieser erneut mit der Volumenenergie zur Verarbeitung des kupferbasierten Werkstoffs aufgeschmolzen. Da die hierfür benötigte Energie wesentlich über der des Stahlwerkstoffs liegt, kommt es zur Bildung von Poren (KEMPEN ET AL. 2011b).

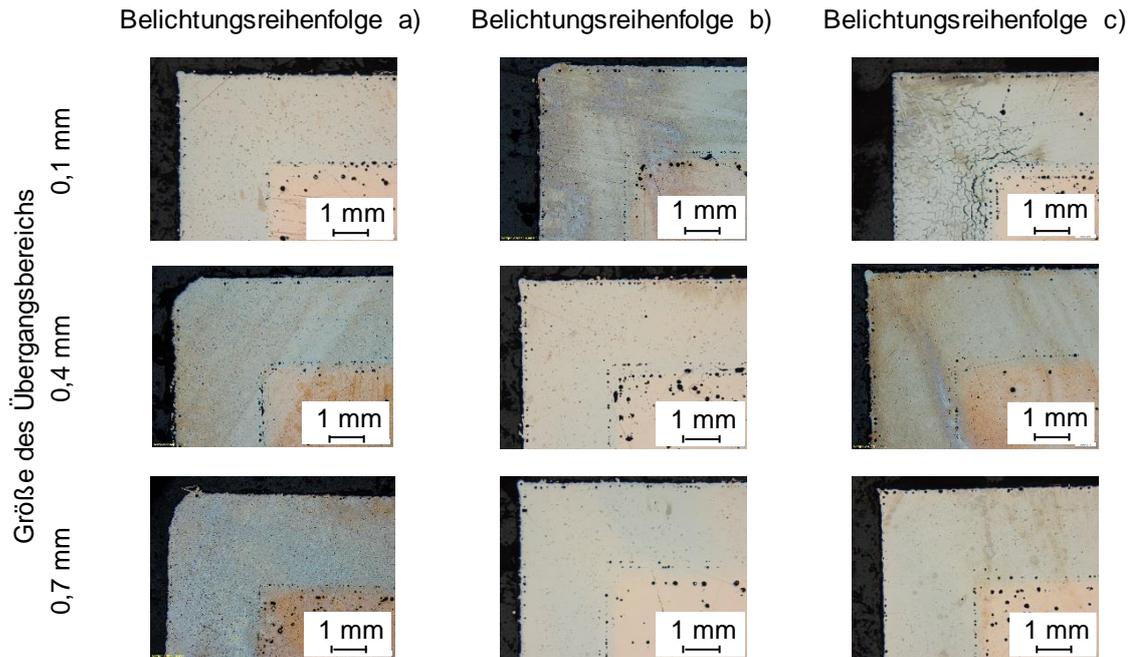


Abbildung 6-21: Schlichtbilder in der Bauebene von Probekörpern mit unterschiedlicher Belichtungsreihenfolge und unterschiedlich großem Übergangsbereich. Jeweils außen Werkzeugstahl und innen Kupferlegierung CW106C

Es ist somit nur ein geringer Einfluss der Belichtungsreihenfolge festzustellen. Um eine Verbindung herzustellen, muss der Übergangsbereich noch einmal belichtet werden, damit in der Schmelzphase eine Verbindung der beiden Werkstoffe entstehen kann. Die zeitliche Abfolge, ob zunächst beide werkstoffspezifischen Bereiche verfestigt werden oder nur ein werkstoffspezifischer Bereich als verfestigtes Bauteil vorliegt, während der andere Werkstoff noch in Pulverform vorliegt, spielt somit keine Rolle.

6.3.3 Größe des Übergangsbereichs

6.3.3.1 Analyse der Bauteilqualität

Die Untersuchungen hierzu erfolgten anhand der Proben zur Analyse der Belichtungsreihenfolge (siehe Abschnitt 6.3.2). Bei den Schlichtbildern sind große Unterschiede unter dem Gesichtspunkt der Größe des Übergangsbereichs zu sehen (vgl. Abbildung 6-22). Bei einer Größe von 0,1 mm sind zwischen den beiden Werkstoffen deutliche Fehlstellen zu erkennen. Wird der Übergangsbereich größer, können keine Fehlstellen mehr erkannt werden. Dies spiegelt sich auch in der relativen

Dichte der Bauteile wider, die bei größerem Übergangsbereich höhere relative Dichten erreichen (siehe Abbildung 6-20).

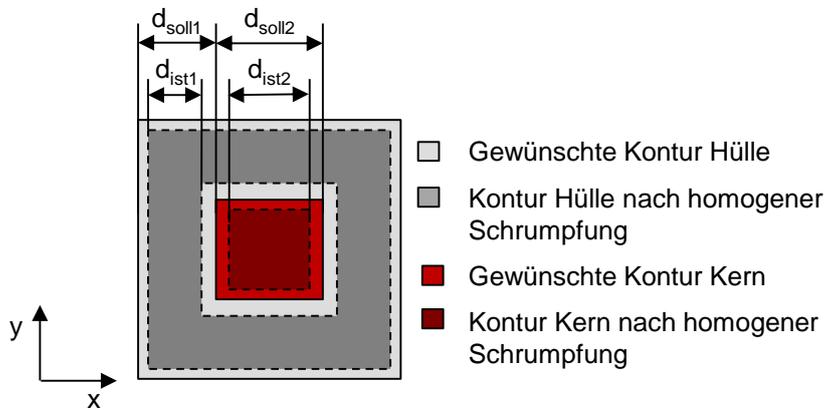


Abbildung 6-22: Schrumpfungseffekte bei der Fertigung von 3-D-Multimaterialbauteilen

Ist kein Übergangsbereich vorgesehen, erfolgt keine Verbindung der beiden Materialbereiche. Wie aus Abbildung 6-20 deutlich wird, muss für die Materialkombination Kupferlegierung CW106C und Werkzeugstahl 1.2709 ein Grenzwert von 0,1 mm überschritten werden, um Bauteile zu fertigen, welche im Übergangsbereich eine höhere Dichte als 99 % aufweisen.

6.3.3.2 Diskussion

Es kann ein Einfluss der Größe des Übergangsbereichs auf die Qualität der Multimaterialverbindung beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Schrumpfung der Bauteile, der sich aufgrund des Abkühlens nach dem Schmelzvorgang ergibt (SHIOMI ET AL. 2004). Hierbei verringert sich die Größe des Bauteils entsprechend des Wärmeausdehnungskoeffizienten des jeweiligen Materials (siehe Abbildung 6-22). Auf Basis der Ausgangslänge d_{soll} , der Temperaturdifferenz ΔT sowie des Wärmeausdehnungskoeffizienten α lässt sich mithilfe der Formel (6-1) der Schrumpfung für die beiden werkstoffspezifischen Bereiche berechnen. Die jeweiligen werkstoffspezifischen Werte sind in Tabelle 6-5 aufgeführt. Randbedingung für diese Formel ist, dass sich die Schrumpfung in allen Raumachsen gleichmäßig ausbildet. Der Einfluss des Prozessgases wird vernachlässigt. Dieses kann eine kühlende Wirkung auf die Bauteiloberfläche haben. Wird eine homogene Schrumpfung angenommen, ergibt sich die absolute Spaltgröße Δl_{abs} für die

Bauebene aus der Hälfte der Summe der beiden werkstoffspezifischen Werte Δl_1 und Δl_2 (6-2).

$$\Delta l_n = d_{\text{solln}} \cdot \alpha_n \cdot \Delta T_n \quad (6-1)$$

$$\Delta l_{\text{abs}} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{2} \quad (6-2)$$

$$d_{\text{soll,1}} + d_{\text{soll,2}} = d_{\text{ist,1}} + d_{\text{ist,2}} + \Delta l_1 + \Delta l_2 \quad (6-3)$$

Tabelle 6-5: Randbedingungen für die Bestimmung des Schrumpfs der werkstoffspezifischen Bereiche

	Einheit	Wert
$d_{\text{soll,Stahl}}$	mm	2,5
α_{Stahl}	-	11,6
ΔT_{Stahl}	K	1480
$d_{\text{soll,CW106C}}$	mm	5
α_{CW106C}	-	18,6
ΔT_{CW106C}	K	1060

Die Werte für ΔT_{Stahl} und ΔT_{CW106C} berechnen sich aus der jeweiligen Schmelztemperatur sowie der im Bauraum herrschenden Temperatur von 200 °C, welche von der Bauraumheizung erzeugt wird.

So ergibt sich für den CW106C-Bereich insgesamt eine Reduzierung von etwa 0,099 mm und für den Stahlbereich von 0,043 mm, was eine absolute Schrumpfung von 0,07 mm ergibt. Um nun einen metallurgischen und stoffschlüssigen Verbund im Fertigungsprozess herzustellen, müssen diese 0,07 mm überschritten werden. In den Versuchen sind allerdings auch bei einer Übergangsbereichsgröße von 0,1 mm noch Fehlstellen aufgetreten. Wie erwähnt wird eine homogene Reduzierung der beiden werkstoffspezifischen Bereiche angenommen. Es ist jedoch zu beachten, dass beispielsweise verschiedene Belichtungsstrategien zu unterschiedlich starkem Verzug führen können, welcher sich in verschiedenen Bereichen unter-

schiedlich stark ausprägt (CHENG ET AL. 2016). Dies kann als Ursache für die Bildung von Fehlstellen zwischen den beiden werkstoffspezifischen Bereichen bei einer Übergangsbereichsgröße von 0,1 mm gesehen werden.

Ein weiterer Grund für die höhere Dichte bei größeren Übergangsbereichen kann in der Länge der einzelnen Vektoren gesehen werden, die für den zweiten Belichtungsvorgang genutzt werden. Bei geringen Vektorlängen kommt es zu einem überproportionalen Energieeintrag als Folge von verzögerten Ein- und Ausschalten des Lasers. Hierdurch kann es vor allem am Ende der einzelnen Belichtungsvektoren zu einem Kollabieren des Schmelzbades kommen, wodurch sich Gasporen ausbilden können. Diese können auch in Abbildung 6-20 gesehen werden.

Aus diesen beiden Erkenntnissen kann gefolgert werden, dass die Größe und die Gestaltung des Übergangsbereichs ein wichtiger Faktor für die Herstellung von riss- und porenfreien Übergängen ist. Um Fehlstellen zu vermeiden, muss der Schrumpf der beiden Werkstoffe kompensiert werden. Gleichzeitig müssen die Belichtungsvektoren lang genug sein, um die Bildung von Gasporen zu vermeiden.

6.3.4 Belichtungsmuster

6.3.4.1 Analyse der Bauteilqualität

Zur Analyse der Belichtungsmuster wurde je ein Bauprozess mit unterschiedlichen Mustern und unterschiedlich großem Übergangsbereich gefertigt, wobei jeweils dreimal der gleiche Probekörper gefertigt wurde. Die gefertigten Proben sind in Abbildung 6-23 zu sehen. Schliffbilder der Muster Rahmen und Brücke sind in Abbildung 6-23 zu sehen, wobei Belichtungsstrategie a) erstgenanntem Muster entspricht und b) bzw. c) dem zweiten. Für die Belichtungsmuster Schachbrett und Verzahnung sind exemplarische Schliffbilder in Aufbaurichtung in Abbildung 6-24 zu sehen.

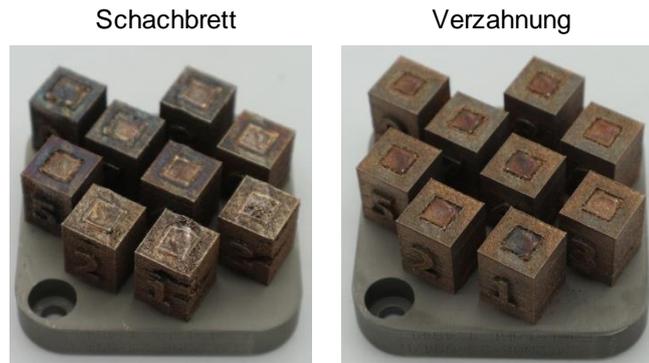


Abbildung 6-23: Gefertigte 3-D-Multimaterialprobekörper mit den Belichtungsmustern Schachbrett (links) und Verzahnung (rechts) aus Werkzeugstahl 1.2709 und der Kupferlegierung CW106C

Vor allem bei den Belichtungsmustern Schachbrett und Verzahnung sind deutliche Fehlstellen zu erkennen (Abbildung 6-24). Diese treten unabhängig von der Größe des Übergangsbereichs verstärkt an dessen Grenzen auf. Bei den Belichtungsmustern Rahmen und Brücke sind diese nur in geringerem Maße festzustellen.

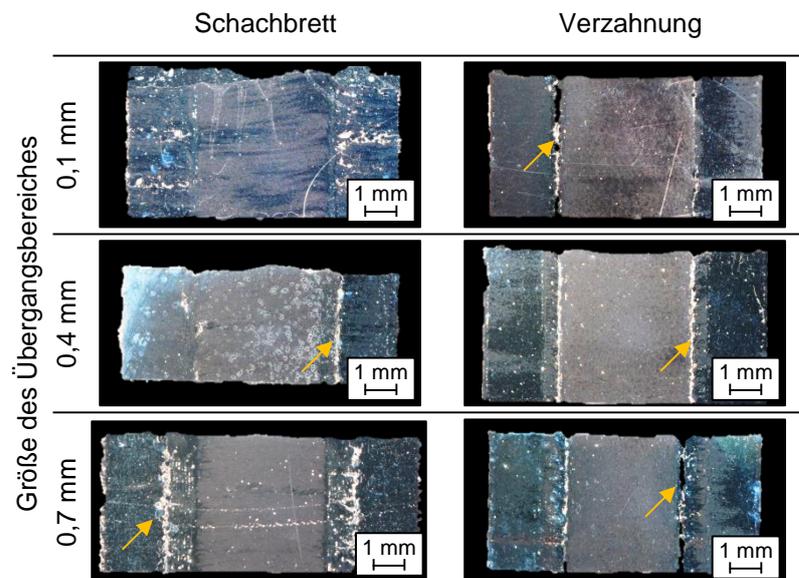


Abbildung 6-24: Schlifffbilder in Aufbaurichtung von Proben mit unterschiedlichem Belichtungsmuster und unterschiedlich großem Übergangsbereich. Jeweils außen Werkzeugstahl 1.2709 und innen Kupferlegierung CW106C. Gelbe Pfeile markieren Fehlstellen.

6.3.4.2 Diskussion

Als Ursache für die entstandenen Fehlstellen kann ein zu hoher Energieeintrag in den Übergangsbereich gesehen werden. Infolge der Vermischung der beiden Werkstoffe in diesem Bereich sowie der Tatsache, dass ein Werkstoff bereits verfestigt ist, verändern sich die thermischen Eigenschaften im Vergleich zu denen der reinen Werkstoffe. Dies bewirkt eine Veränderung der Prozessparameter im Übergangsbereich. Im Falle der Brücke wurde durch den Einsatz eines extra Parametersatzes für den Übergangsbereich auf diese Tatsache Rücksicht genommen.

Bei allen Belichtungsstrategien kommen kurze Belichtungsvektoren zum Einsatz, weswegen das Vorgehen mit der Belichtung vieler einzelner Punkte verglichen werden kann. MERKT (2015) zufolge wird durch den Einsatz einer solchen Punktbelichtungsstrategie die Abkühlrate herabgesetzt. Infolge einer geringeren Abkühlrate erhöht sich die Temperatur im Grundwerkstoff. Dies bewirkt, dass die benötigte Volumenenergie im Vergleich zu Belichtungsstrategien mit längeren Vektoren niedriger ist. Wird dennoch die gleiche Volumenenergie eingebracht, führt dies zu Porenbildung, wie sie bei allen vorliegenden Proben zu beobachten ist.

6.4 Analyse der Störgrößen

Alle gezeigten Versuchsergebnisse wurden mit prototypischer Anlagentechnik gefertigt. Hierbei können infolge von Fehlfunktionen Fehler auftreten. Um deren Einfluss zu minimieren, wurden alle Versuchskörper mehrfach gefertigt. Zur Vollständigkeit werden im Folgenden mögliche Fehlerursachen aufgeführt.

Die Qualität der Bauteile schwankte teilweise sehr stark. Hierfür können verschiedene Ursachen angeführt werden. Ein Faktor ist die Querkontamination. Wird ein Material nicht zuverlässig aus dem Bauprozess entfernt, kann dies zu einem Vermischen der Werkstoffe führen. Je nach Konzentration können sich so beispielsweise spröde Phasen im verfestigten Werkstoff ausbilden. Dies führt zu einer erhöhten Neigung zur Rissbildung. Auch kann dies dazu führen, dass sich die Prozessparameter verändern und sich somit Fehlstellen im Bauteil ausbilden.

Neben den prozessbedingten Ursachen können durch die verwendete Anlage Querkontaminationen entstehen. Beispielsweise kann die Absaugung der Werkstoffe unzureichend sein. Auch können Partikel an der Beschichterlippe haften

bleiben und auf diese Weise im Bauraum verteilt werden. Dies kann mit dem Einsatz von Überwachungssystemen detektiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit war eine Optimierung des Absaugverhaltens nur durch ein Verfahren der Bauplattform sowie durch eine variabel einstellbare Verfahrensgeschwindigkeit des Beschichtermoduls möglich, an welchem das Absaugmodul befestigt ist. Eine Veränderung des Volumenstroms durch eine höhere Pumpenleistung war für die hier verwendete Anlage nicht vorgesehen. Auch konnten die genannten Variablen nicht für die Werkstoffe einzeln optimiert werden, sodass der gesamte Fertigungsprozess mit einer Einstellung erfolgte.

Aufgrund der begrenzten Zugänglichkeit der Anlagensteuerung war es auch nicht möglich, noch eine mechanische Reinigungseinheit, beispielsweise in Form einer Bürste, in den Prozess zu integrieren. Hierzu wäre es notwendig gewesen, diese bei den Entfernvorgängen auf die Bauebene abzusenken und während den Pulverauftragsvorgängen wieder nach oben zu fahren, sodass die neu aufgebrachte Schicht nicht beschädigt wird.

Ein weiterer Faktor ist, dass die Bauteile manuell positioniert werden mussten, da die Software zur Vorbereitung der Fertigungsdaten die Funktion bislang nicht vorsieht. Hierdurch kann es zu Abweichungen der geplanten und der tatsächlich gefertigten Ausführung kommen.

6.5 Fazit

Ziel dieses Kapitels ist es, Einflussgrößen zu identifizieren, mögliche Steuergrößen abzuleiten und deren Einfluss auf den Fertigungsprozess und die Bauteilqualität zu analysieren.

Es zeigt sich, dass die thermischen und die thermo-mechanischen Eigenschaften den Multimaterialprozess beeinflussen. Diese müssen vor allem im Übergangsbereich zwischen Material A und Material B beachtet werden. Die thermischen Eigenschaften beeinflussen vor allem den Temperaturgradienten, der maßgeblich die Eigenspannungen im Bauteil bestimmt. Überschreiten die Eigenspannungen die Festheitsgrenze, bilden sich Risse im entsprechenden Werkstoff aus.

Da eine Verbindung auf stofflicher Ebene erfolgt, spielt auch das Materialsystem eine Rolle. Bei der hier betrachteten Werkstoffkombination, aus eisenbasiertem Stahlwerkstoff und einer kupferbasierten Legierung, treten keine Herausforderungen auf, da sich zwei Kristallsysteme unabhängig voneinander ausbilden.

Diese Einflüsse können mithilfe einer nachgelagerten Belichtung des Übergangsbereichs und der Größe des Übergangsbereichs gezielt beeinflusst werden. Wird der Werkstoff mit der höheren Wärmeleitfähigkeit als Zweites aufgeschmolzen und verfestigt, kann der Einfluss der thermischen Leitfähigkeit im Fertigungsprozess kontrolliert werden. Die Größe des Übergangsbereichs kann den Einfluss der Wärmeausdehnung der Werkstoffe kompensieren. Daher ist es notwendig, die werkstoffspezifischen Bereiche so zu gestalten, dass ein Übergangsbereich gegeben ist. Ist ein Verbund beider werkstoffspezifischer Bereiche hergestellt, können Eigenspannungen entstehen, da die Schwindung durch die benachbarten Bereiche behindert wird. Diese Spannungen können durch eine nachgelagerte Belichtung reduziert werden.

Der Einfluss der verschiedenen Materialeigenschaften überlagert sich im Fertigungsprozess und kann daher nicht isoliert betrachtet werden. Auch muss berücksichtigt werden, dass es zu Querkontaminationen in den werkstoffspezifischen Bereichen kommen kann. Je nach Materialkombination kann dies spröde Phasen zur Folge haben, die die Festigkeit herabsetzen. Diese Querkontaminationen können infolge einer unzureichenden Absaugung entstehen. Weitere Ursachen können ein Pulverübertrag während des Pulverauftrags oder entstehende Spritzer während des Verfestigungsprozesses sein.

7 Qualifizierung von 3-D-Multimaterialkombinationen

Aufbauend auf identifizierten Einfluss- und Steuergrößen des Multimaterialprozesses aus dem vorangegangenen Kapitel 6 wird ein allgemeines mehrstufiges Vorgehen abgeleitet, das es ermöglicht, Multimaterialbauteile aus zwei verschiedenen metallischen Werkstoffen mit diskretem Materialübergang herzustellen. Primäres Ziel des Vorgehens ist es, die Kombinierbarkeit von zwei Werkstoffen im LBM-Prozess zu bestimmen. Als sekundäres Ziel können mithilfe dieses Vorgehens Multimaterialprozessparameter bestimmt werden, die die Herstellung von Bauteilen mit einem Materialwechsel in der Fertigungsebene ermöglichen. Diese sollen keine Risse oder Fehlstellen als Folge von unaufgeschmolzenen Bereichen im Übergangsbereich aufweisen.

7.1 Vorgehen zur Qualifizierung von Multimaterialkombinationen

Die Fertigung von 3-D-Multimaterialbauteilen stellt aufgrund der Vielzahl an Faktoren eine große Herausforderung dar. Um die Umsetzung effizient zu ermöglichen, wird im Folgenden das in Abbildung 7-1 schematisch dargestellte Vorgehen erläutert.

Im ersten Schritt erfolgt eine Literaturrecherche zur Ermittlung der Kombinierbarkeit von zwei Werkstoffen. Besondere Beachtung sollten hierbei auf den thermischen und thermo-mechanischen Materialeigenschaften liegen. Darüber hinaus, wird auch das Phasendiagramm des Hauptsystems untersucht. Als Hauptsystem werden hier die Elemente verstanden, welche den größten Anteil am jeweiligen Werkstoffsystem haben. Dies ermöglicht es Herausforderung zu identifizieren.

Danach erfolgt die Qualifizierung der Monomaterialien im Monomaterialprozess. Ziel ist es, Prozessparameter zu definieren, die eine prozesssichere Herstellung von Bauteilen mit einer vom Anwender definierten relativen Dichte sicherstellen. Sind für jeden Werkstoff Parameter identifiziert, können zum einen die Monomaterialbereiche im Multimaterial -Bauteil prozesssicher hergestellt werden, zum anderen können im weiteren Verlauf der Qualifizierung auftretende Effekte Wechselwirkungen zwischen den beiden Werkstoffen besser zugeordnet werden. Somit stellen diese Parameter die Basis für das weitere Vorgehen dar.

7.1 Vorgehen zur Qualifizierung von Multimaterialkombinationen

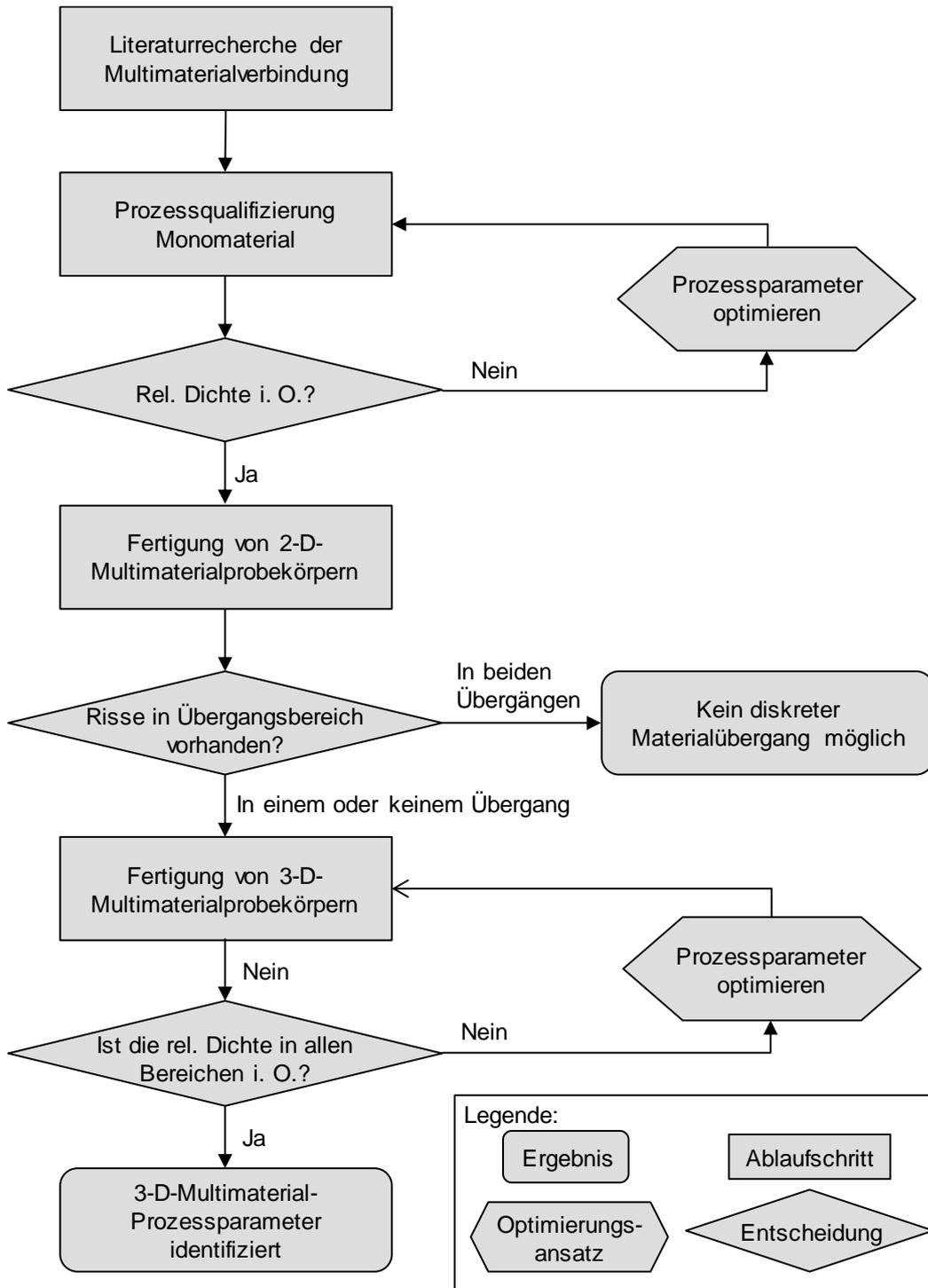


Abbildung 7-1: Vorgehen zur Qualifizierung von 3-D-Multimaterialkombinationen

Im Anschluss werden 2-D-Multimaterialproben gefertigt, wobei zwei Bereiche aus Material A durch einen Abschnitt aus Material B in Aufbaurichtung unterbrochen werden oder umgekehrt (vgl. Abbildung 6-6). So können beide Arten von Werk-

7.1 Vorgehen zur Qualifizierung von Multimaterialkombinationen

stoffübergängen in einem Bauteil analysiert werden und es wird gleichzeitig sowohl Material als auch Fertigungs- und Analysezeit eingespart. Die Aufbaureihenfolge sollte vor allem von der Verfügbarkeit der Pulverwerkstoffe abhängig gemacht werden. Daher sollte das Material, von dem entweder weniger vorhanden ist oder das einen höheren Kilogrammpreis hat, für den mittleren Bereich verwendet werden. Eine Alternative wäre ein Vorgehen abhängig von der Verfestigungsdauer. Um diese möglichst kurz zu halten, muss das Material für den mittleren Bereich gewählt werden, das die längere Belichtungszeit benötigt. Bei der Wahl der Größe der einzelnen Materialabschnitte sollte darauf geachtet werden, dass eventuell auftretende Wechselwirkungen insbesondere in der Wärmeeinflusszone sich nicht gegenseitig beeinflussen oder gar überlagern. Die Höhe sollte daher größer als die Wärmeeinflusszone sein.

Von den auf diese Weise hergestellten Probekörpern wird anschließend ein Schliffbild erstellt, welches mikroskopisch untersucht wird. Die Analyse dieser Bilder gibt Aufschluss über die Qualität der Multimaterialverbindung. Besonderes Augenmerk sollte hierbei auf Rissbildung im Übergangsbereich gelegt werden. Treten in beiden Werkstoffübergängen Risse auf, können die Werkstoffe nach dem im vorangegangenen Abschnitt gewonnen Prozessverständnis, nicht mit einem diskreten Werkstoffübergang hergestellt werden. Infolge der inkrementell kleinen Veränderungen bei der Fertigung von gradierten Werkstoffübergängen kann es jedoch möglich sein, derartige Werkstoffverbünde zu generieren. Dies sollte im Rahmen weiterführender Arbeiten untersucht werden.

Sind in nur einem oder bei keinem der beiden Werkstoffübergänge Risse zu erkennen, ist die Herstellung von 3-D-Multimaterialbauteilen mit diskreten Werkstoffübergängen möglich.

Abschließend werden mit verschiedenen Parametern 3-D-Multimaterialproben gefertigt. Dieser Schritt baut auf der prozesssicheren Verarbeitung der beteiligten Werkstoffe im Monomaterialprozess sowie den Erkenntnissen aus der Fertigung der 2-D-Multimaterialprobekörper auf. Daher liegt der Fokus dieses Arbeitsschritts auf den Wechselwirkungen der zu verarbeitenden Werkstoffe in einer Pulverschicht. Wie aus Abschnitt 6.3.3 deutlich wird, sind hierbei der Übergangsbereich, die räumliche Anordnung und die Belichtungsreihenfolge als neue Prozessparameter zu betrachten.

7.1 Vorgehen zur Qualifizierung von Multimaterialkombinationen

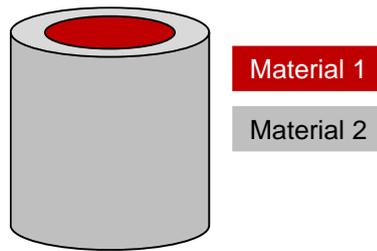


Abbildung 7-2: Mögliche Gestaltung von Probekörpern zur Identifikation geeigneter Multimaterialprozessparameter

Als Probengeometrie sollten einfache Strukturen eingesetzt werden, bei welchen ein Werkstoffbereich innerhalb des anderen liegt. Als Beispiele können Strukturen herangezogen werden, wie sie in Abbildung 6-14 oder Abbildung 7-2 dargestellt sind.

Um die Verarbeitbarkeit eines Werkstoffsystems im Multimaterialprozess zu validieren, sollten die Startparameter wie folgt gewählt werden:

- *Übergangsbereich:*
Der Übergangsbereich sollte so groß gewählt werden, dass der Schrumpf der beiden werkstoffspezifischen Bereiche kompensiert wird. Die Mindestgröße kann mithilfe der Formeln 6-1 und 6-2 bestimmt werden.
- *Belichtungsreihenfolge:*
Konnte nur bei einem Übergang keine Rissbildung beobachtet werden, ist diese Belichtungsreihenfolge zu bevorzugen. Sind bei keinem Materialübergang Risse entstanden, kann die Belichtungsreihenfolge frei gewählt werden.
- *Räumliche Anordnung:*
Diese sollte entsprechend der im Bauteil tatsächlich auftretenden Anordnung gewählt werden, um bereits hier die Fertigbarkeit sicherzustellen und zusätzliche Untersuchungen zur umgekehrten Anordnung zu vermeiden.

Diese ermöglichen auch eine zeiteffiziente, ressourcenschonende und anwendungsorientierte Prozessqualifizierung.

Nach der Fertigung werden Schlifffbilder der Bauebene und in Aufbaurichtung der Proben mittels optischer und bildgebender Verfahren analysiert. Treten Risse im Übergangsbereich oder einem der werkstoffspezifischen Bereiche auf, kann davon ausgegangen werden, dass diese Werkstoffkombination nicht verarbeitet werden kann.

7.2 Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400

Können keine Risse gefunden werden, wird die Dichte mittels bildgebender Verfahren sowie unter Nutzung von Binarisierung der Aufnahmen bestimmt. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die werkstoffliche Zusammensetzung der Probe nicht bekannt sein muss, was vor allem im Übergangsbereich nicht genau möglich ist. Erreichen die Werte nicht die angestrebte relative Dichte, kann über eine Anpassung der Belichtungsparameter, insbesondere der Belichtungsgeschwindigkeit, der Laserleistung und des Spurabstands, eine Optimierung erfolgen. Treten Fehlstellen zwischen den beiden werkstoffspezifischen Bereichen auf, ist der Übergangsbereich zu vergrößern. Weitere mögliche Optimierungsmaßnahmen und mögliche Fehlerbilder können dem Anhang entnommen werden (siehe 11.7).

Das gezeigte Vorgehen wird anhand von der Werkstoffkombinationen Kupferlegierung CW106C mit Aluminiumlegierung EN AC-43400 gezeigt.

7.2 Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400

In diesem Abschnitt wird das gerade vorgestellte Vorgehen am Beispiel der Multimaterialverarbeitung von Kupferlegierung CW106C mit der Aluminiumlegierung EN AC-43400 beschrieben. Daher wird nun das Vorgehen schrittweise am Beispiel dieser Verbindung durchgeführt. Somit erfolgt zunächst eine Auswertung der bereits bestehenden Literatur hinsichtlich bestehender Erfahrungen bei der Verbindung dieser beiden Werkstoffe.

7.2.1 Auswertung der Literatur

Die Literatursauswertung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt liegt der Fokus auf den metallurgischen Gesichtspunkten, wie der Bildung von intermetallischen Phasen. Für die Verbindung von Aluminium und Kupfer als Hauptbestandteile beider Legierungen können anhand des Phasendiagramms zahlreiche intermetallische Phasen identifiziert werden. Diese treten vor allem bei Kupferanteilen zwischen 50 und 80 % auf. Diese Phasen sind von besonderem Interesse, da in diesen Bereichen abweichende mechanischen Eigenschaften, wie geringere Zähigkeit und höhere Härten infolge von spröden Phasen entstehen (SCHMALEN ET AL. 2018). Dies ist für das Laserstrahlschmelzen von besonderer Bedeutung, da spröde Phasen schneller zur Rissbildung neigen und somit die Verarbeitung mit dieser Fertigungstechnologie erschweren. ALKAHARI ET AL. (2012) und SCHMALEN ET AL. (2018) fanden heraus, dass für einen Rissfortschritt besonders die η_2 - sowie

7.2 Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400

die γ_1 -Phasen kritisch sind, welche bei einer Zusammensetzung von ca. 52–54 At.-% Cu sowie 64–70 At.-% Cu entstehen (siehe Abbildung 7-3). Im Laserstrahlschmelzprozess können diese Materialverteilungen daher kritische Bereiche darstellen.

Im zweiten Schritt wird geprüft, ob die Materialverbindungen aus Cu und Al bereits mithilfe von anderen fügenden oder urformenden Fertigungsverfahren hergestellt werden konnten und worin dabei die Herausforderungen lagen. Beispielsweise konnten bei einer Verbindung mittels Rührreibschweißen sowie Ultraschall- und Laserstrahlschweißen ebenfalls die intermetallischen Phasen Al_4Cu_9 , AlCu , Al_2Cu und Al_2Cu_3 identifiziert werden (FUJII ET AL. 2018, SCHMALEN ET AL. 2018, SINHA ET AL. 2016). Dies konnte auch für diffusionsbasierte Fügeverfahren, wie Kaltschweißen, beobachtet werden. Darüber hinaus konnten insbesondere in intermetallischen Phasen aus AlCu und Al_3Cu_4 erhöhte Härten festgestellt werden, was auf eine höhere Sprödheit dieser Bereiche deuten kann (LEE, KWANG, SEOK & KWON 2013).

Bei den genannten Untersuchungen wurde kein Einfluss von unterschiedlichen thermischen oder thermo-mechanischen Eigenschaften genannt.

Diese Erkenntnisse lassen darauf schließen, dass mit spröden intermetallischen Phasen im Übergangsbereich zwischen der Aluminiumlegierung und der Kupferlegierung zu rechnen ist. Dies kann zu Rissbildung im Übergangsbereich führen, wodurch die Herstellung von Multimaterialverbindungen im Laserstrahlschmelzprozess behindert werden kann. Inwieweit dies zutrifft, wird im Folgenden mittels experimenteller Versuche geprüft.

7.2 Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400

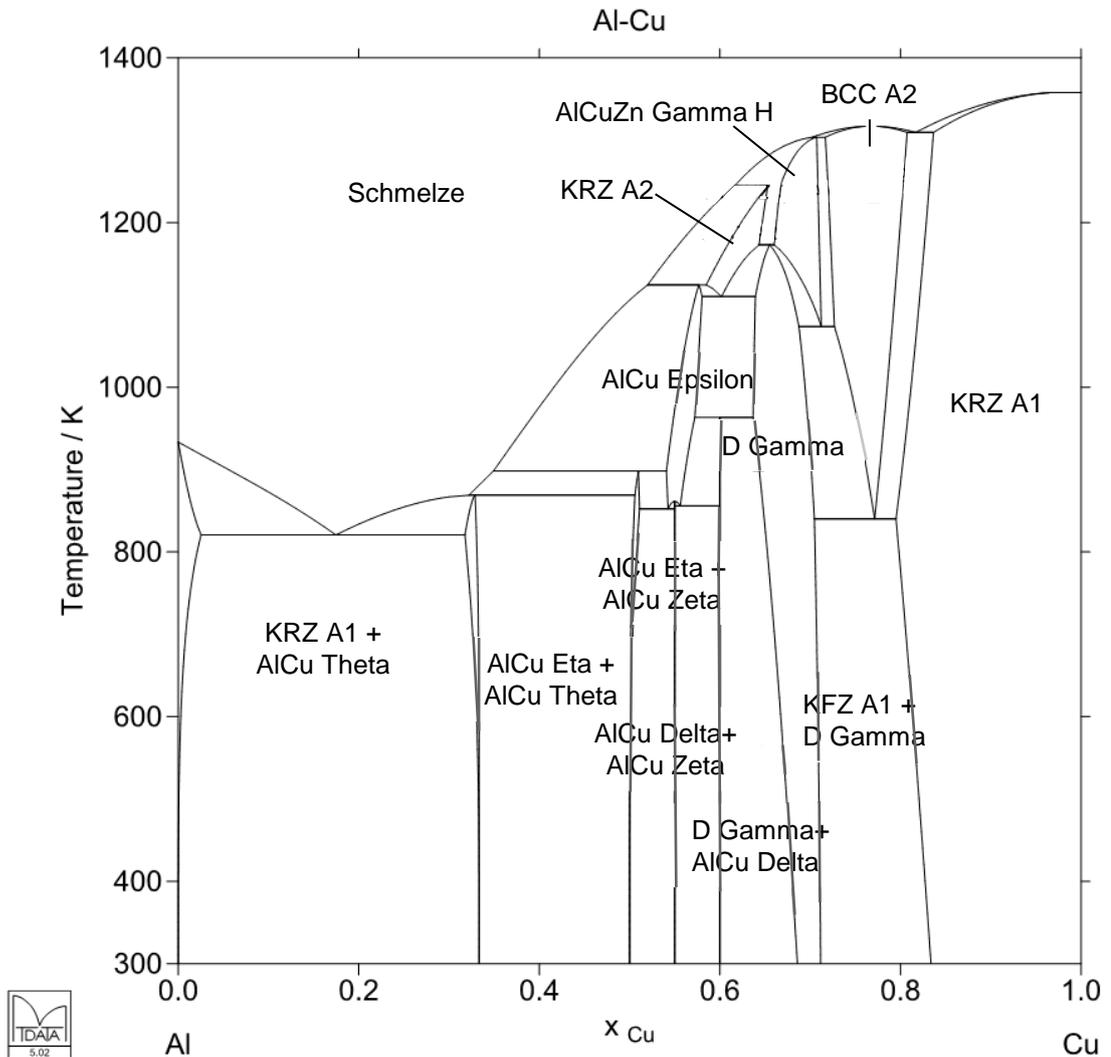


Abbildung 7-3: Phasendiagramm des Materialsystems Aluminium-Kupfer
(PONWEISER ET AL. 2011), (NATIONAL PHYSIK LABRATORY 2010)

7.2.2 Monomaterialproben

Die Qualifizierung der Kupferlegierung CW106C wurde in dieser Arbeit bereits in Abschnitt 6.1.1 dargelegt, weswegen an dieser Stelle hierauf verwiesen werden soll. Im Folgenden wird auf die Validierung von Prozessparameter zur Verarbeitung von Monomaterialproben aus EN AC-43400 näher eingegangen. Hierzu wird das Vorgehen von YADROITSEV ET AL. (2015) auf die Anfertigung von Würfeln reduziert und somit direkt Probekörper der Abmaße 10x10x10 mm³ gefertigt. Zusätzlich werden die in anderen Arbeiten identifizierten Verarbeitungsparameter als Ausgangspunkt für die Experimente genutzt (vgl. Abschnitt 3.1.3). Innerhalb des

7.2 Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400

in Tabelle 7-1 gezeigten Prozessfensters sind insgesamt 27 Probekörper gefertigt und analysiert worden. Der ausführliche Versuchsplan ist in Tabelle 11-3 im Anhang 11.2 zu finden.

Tabelle 7-1: Untersuchte Parameter zur Qualifizierung von EN AC-43400 für den Laserstrahlschmelzprozess

	Einheit	Wert
Laserleistung P_L	W	250 - 350
Belichtungsgeschwindigkeit v_s	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	900 - 1900
Spurabstand s_a	μm	120 - 200
Schichtdicke h_s	μm	30
Vorheiztemperatur T_{HV}	$^{\circ}\text{C}$	200

Die relativen Dichten der gefertigten Proben lagen zwischen 94,3 % und 99,7 %. Die höchste relative Dichte wurde mit einer Laserleistung von 300 W, einem Spurabstand von 120 μm und 1600 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ erreicht. Eine Mikroskopieaufnahme eines Schliffes mit 99,7 % relativer Dichte ist in Abbildung 7-4 zu sehen. Dieses weist nur wenige sehr kleine Fehlstellen auf. Eine leicht verstärkte Porenbildung kann am oberen sowie rechten Randbereich der Probe festgestellt werden. Da dieser Parametersatz die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen von mehr als 99 % relativer Dichte erfüllt, wird dieser Parametersatz für die weiteren Untersuchungen genutzt.

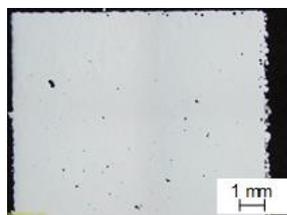


Abbildung 7-4: Schliffbild eines Monomaterialprobekörpers aus EN AC-43400 mit 99,7 % relativer Dichte, gefertigt mit $P_L = 300\text{ W}$, $v_s = 1600\frac{\text{mm}}{\text{s}}$, $s_a = 120\ \mu\text{m}$

7.2.3 2-D-Multimaterialproben

Zur Fertigung von 2-D-Multimaterialproben wurden die Parameter verwendet, welche die höchsten relativen Dichten der Monomaterialproben erzeugten. Bei höheren Belichtungsgeschwindigkeiten, wodurch ggf. höhere Aufbauraten erreicht werden könnten, konnten die angestrebten relativen Dichten nicht erreicht werden. Wie in Abschnitt 7.1 beschrieben, werden zunächst 2-D-Multimaterialproben gefertigt. Diese sind in Abbildung 7-5 zu sehen, wobei die mittlere Schicht aus der Kupferlegierung besteht.

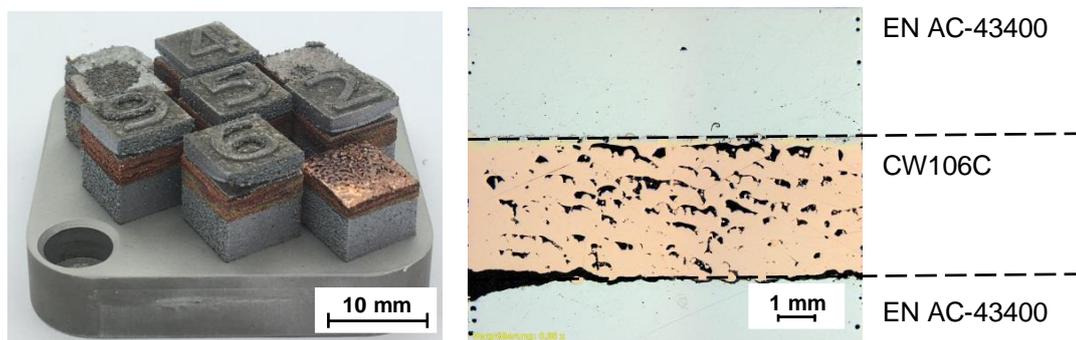


Abbildung 7-5: Links: Gefertigte Sandwichstrukturen aus EN AC-43400 und CW106C; rechts: Schliffbild des Probekörpers 2

Die gefertigten Proben zeigten alle eine schlechte Anbindung der Kupferlegierung an die Aluminiumlegierung. Gleiches gilt auch für die Verarbeitung in umgekehrter Reihenfolge. In vier Fällen musste der Bauprozess frühzeitig abgebrochen werden, da keine Anbindung erfolgte (vgl. in Abbildung 7-6 Probekörper vorne rechts und hinten rechts). Bei den angefertigten Schliffbildern sind Risse in beiden Übergangsbereichen zu erkennen. Eine mögliche Ursache für das Ablösen lässt sich auf die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von EN AC-43400 und der Kupferlegierung CW106C und den dadurch beeinflussten Wärmefluss im Fertigungsprozess zurückführen. Aufgrund der höheren spezifischen Wärmekapazität und der geringeren Wärmeleitfähigkeit von EN AC-43400 im Vergleich zur Kupferlegierung entstehen höhere Temperaturen im Übergangsbereich der beiden Werkstoffe (siehe Tabelle 3-6 und Tabelle 3-9).

Dies führt zu einer stärkeren Wärmeausdehnung der Kupferlegierung, wodurch höhere Eigenspannungen entstehen, was das Ablösen von der Bauplatte bewirkt. Bei größeren Belichtungsgeschwindigkeiten wird eine geringere Menge Energie

7.2 Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400

in das Material eingebracht, wodurch die Temperatur und die Wärmeausdehnung reduziert werden können.

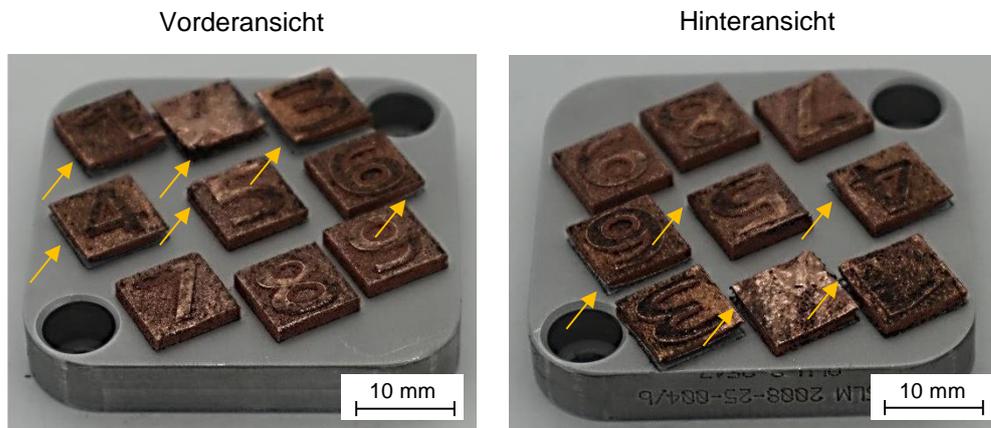


Abbildung 7-6: Anbindungsverhalten der Kupferlegierung CW106C auf Bauplatten aus EN AC-43400, links: Ansicht von vorne, rechts: Ansicht von hinten. Pfeile markieren Ablösungen von der Bauplatte.

Unterschiede in der Wärmeausdehnung können als alleinige Ursache aufgrund der geringen Unterschiede in den Koeffizienten (Kupferlegierung CW106C: $17 \frac{10^{-6}}{\text{K}}$, Aluminiumlegierung EN AC-43400: $20 \frac{10^{-6}}{\text{K}}$) ausgeschlossen werden. Diese ist geringer als bei der Verarbeitung von Werkzeugstahl 1.2709 ($11,1 \frac{10^{-6}}{\text{K}}$) und der Kupferlegierung, bei welcher dieser Effekt nicht aufgetreten ist (vgl. Abschnitt 6.1.2).

Eine weitere Ursache hierfür können die entstehenden intermetallischen Phasen sein, welche bereits in Abschnitt 7.2.1 als eine zu erwartende Herausforderung identifiziert wurden. Diese führen zu einer Versprödung des Werkstoffs, wodurch der Werkstoff schneller zur Rissbildung neigt und somit eine feste Verbindung erschwert wird. Diese Phasen können sowohl in der Schmelzphase als auch durch Diffusion entstehen.

Mit dem Ziel, die Anbindung zu optimieren, wurden Kupferwürfel mit einer Bauhöhe von 3 mm auf Platten aus der Aluminiumlegierung mit unterschiedlichen Belichtungsgeschwindigkeiten zwischen $800 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und $1600 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und gleichbleibender Laserleistung von 400 W aufgebaut. Hierdurch sollen höhere Abkühlraten erzeugt

7.2 Plausibilisierung des Vorgehens anhand der Verbindung Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400

werden, wodurch ein feineres Gefüge und kleinere intermetallische Phasen entstehen sollen. Die Parameter sind im Anhang in Tabelle 11-8 zu finden. In Abbildung 7-6 sind die gefertigten Probekörper dargestellt. Bei den markierten Probekörpern ist auch hier ein Ablösen von der Bauplatte zu beobachten. Dieses trat bei geringeren Belichtungsgeschwindigkeiten bis $1300 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ auf. Ab dieser Geschwindigkeit kann kein Ablösen mehr festgestellt werden.

Der auf diese Weise optimierte Parametersatz ($P_L = 400 \text{ W}$; $v_s = 1600 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$; $s_a = 0,125 \text{ mm}$) wurde bei der Herstellung von Sandwichstrukturen bis zu einer Bauhöhe von 0,15 mm und 0,3 mm genutzt. Die betrachteten Parameter können im Anhang Tabelle 11-9 entnommen werden. Anhand des Schlibbildes in Abbildung 7-7 ist eindeutig zu erkennen, dass keine Verbindung zwischen den beiden Werkstoffen entstanden ist. Die Poren im Kupferbereich sind eine Folge des Parameterwechsels, von Übergangsparameter zu Volumenparameter.

Es kann festgestellt werden, dass mit keinem Parametersatz eine Verbindung zwischen der Aluminium- und der Kupferlegierung hergestellt werden kann. Als Ursachen können spröde intermetallische Phasen sowie Unterschiede in den thermischen Eigenschaften gesehen werden.

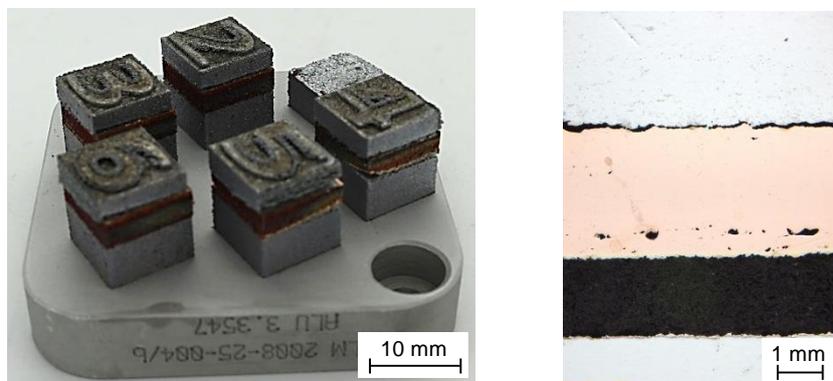


Abbildung 7-7: Links: Gefertigte Sandwichstrukturen aus Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400 mit optimierten CW106C-Prozessparametern; rechts: Schlibbildaufnahme von Probekörper 4

7.2.4 3-D-Multimaterialprobekörper

Um die Validierung des Vorgehens abzuschließen, werden 3-D-Multimaterialproben hergestellt. Diese haben eine Hülle aus der Aluminiumlegierung und einen

Kern aus der Kupferlegierung. Zum Einsatz kamen die in den vorherigen Abschnitten identifizierten und optimierten Prozessparameter. Ein Bild der hergestellten Probekörper ist in Abbildung 7-8 zu sehen.

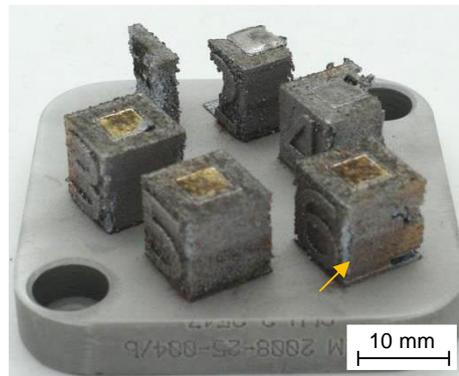


Abbildung 7-8: Gefertigte 3-D-Multimaterialprobekörper aus EN AC-43400 und CW106C. Der gelbe Pfeil deutet auf mögliche Querkontaminationen der Kupferlegierung im Bereich der Aluminiumlegierung.

Analog zu den vorangegangenen Untersuchungen konnten auch keine Multimaterialprobekörper mit einem Materialwechsel innerhalb der Fertigungsschichten hergestellt werden. Neben den in den vorangegangenen Abschnitten besprochenen Ursachen können hier zusätzlich noch mögliche Querkontaminationen infolge einer nicht ausreichenden Absaugung hinzukommen. Diese lassen sich aufgrund der kupferfarbenen Verfärbungen der Aluminiumlegierung insbesondere in den unteren Bereichen vermuten. Eine Überprüfung hiervon mittels EDX-Analyse war mit dem zur Verfügung stehenden Equipment nicht möglich, da die Probekörper keine ausreichende Festigkeit aufwiesen.

7.3 Fazit

In diesem Kapitel wurde ein Vorgehen zur Identifikation möglicher Werkstoffpaarungen für die Multimaterialverarbeitung im Laserstrahlschmelzen vorgestellt und anhand der Verarbeitung der Kupferlegierung CW106C und der Aluminiumlegierung EN AC 43400 gezeigt.

Für diese Paarung stellen insbesondere die intermetallischen Phasen eine Herausforderung dar. Dies konnte bei der Herstellung von 2-D-Multimaterialstrukturen beobachtet werden. Hier verhinderten sie bereits ein Verbinden der beiden Werkstoffe in Aufbaurichtung. Dies bestätigte sich auch bei der Herstellung von 3-D-

Multimaterialproben, welche ebenfalls keine Verbindung der Werkstoffe im Übergangsbereich aufwiesen. Die spröden Phasen verhinderten die Herstellung von Probekörper mit ausreichend hohen Festigkeiten für nachfolgende Untersuchungen. Spröde Werkstoffe neigen schneller zur Bildung von Rissen. Somit zeigen auch Werkstoffverbindungen, die bei bestimmten Mischverhältnissen spröde Phasen ausbilden, dieses Verhalten. Um das Auftreten von Rissen zu vermeiden, ist ein möglicher Ansatz, gezielt Werkstoffkonzentrationen zu erzeugen, bei welchen solche Phasen nicht entstehen. Umgesetzt werden könnte dies beispielsweise mithilfe von gradierten Werkstoffübergängen.

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Multimaterialverarbeitung

Ziel der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist es, die Prozesskette zu analysieren, so dass ineffiziente Prozessschritte sowie mögliche Verschwendungen von Ressourcen identifiziert werden können. Zusätzlich ermöglichen die im Rahmen der Betrachtung entstehenden Kosten- und Zeitmodelle einen Vergleich mit konventionellen Fertigungstechnologien (THOMAS & GILBERT 2014).

Aktuell existieren verschiedene Kostenmodelle im Bereich der additiven Fertigung. Jedes von ihnen legt den Fokus auf einen anderen Schwerpunkt. Das Modell von HOPKINSON & DICKNES (2003) berücksichtigt insbesondere den Vergleich zwischen konventioneller und additiver Fertigung, während LINDEMANN ET AL. (2012) den Schwerpunkt auf die Analyse der Kosten der gesamten additiven bzw. konventionellen Prozesskette legen. Es ist jedoch hervorzuheben, dass in keinem dieser Modelle die Multimaterialverarbeitung berücksichtigt wird.

In diesem Kapitel wird ein Kostenmodell entwickelt, das auf einem Zeitmodell und Stundensätzen beruht. Dieses wird im Nachgang genutzt, um unterschiedliche Szenarien zu analysieren. Das Ziel dieser Analyse ist es, aus ökonomischer Sicht notwendige Handlungsschritte zu identifizieren und hieraus die nächsten Schritte für eine industrielle Entwicklung der LBM-Multimaterialverarbeitung abzuleiten (siehe Abbildung 8-1).

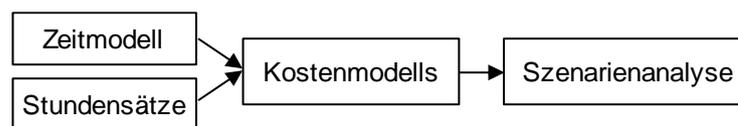


Abbildung 8-1: Vorgehen zur Analyse der Wirtschaftlichkeit der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen

8.1 Entwicklung des Kostenmodells

Das hier entwickelte Modell basiert auf dem von KAMPS ET AL. (2018) entwickelten Modell zur Ermittlung der Kosten von laserstrahlgeschmolzenen Zahnrädern. Die Grundlage bildet eine industrielle Prozesskette, wobei unterschiedliche Herstellungstechnologien zum Einsatz kommen. Dieses Modell ermöglicht es, die

Auswirkungen von verschiedenen Kostentreibern auf den Gesamtprozess zu analysieren und somit Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Hierzu wurden die Einsatzdauer, Materialkosten sowie Arbeitsmaschinenkosten mit einberechnet. Um diese Kosten darzustellen, wurde zunächst ein Zeitmodell entwickelt, welches die Dauer der verschiedenen Produktionsschritte berücksichtigt. Hieraus kann das Kostenmodell abgeleitet werden, indem die einzelnen Prozessschritte mit Kosten hinterlegt werden.

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wird in dieser Arbeit ein Multimaterialbauteil angenommen, das aus zwei unterschiedlichen metallischen Werkstoffen besteht.

8.1.1 Kostenmodell

Das Kostenmodell setzt sich aus einem Zeitmodell für die Multimaterialprozesskette und den entsprechenden Stundensätzen zusammen. Die Komponenten werden im Folgenden nacheinander aufgebaut und abschließend zu einem gesamten Modell zusammengesetzt.

8.1.1.1 Zeitmodell

Der gesamte Fertigungsprozess kann in acht Prozessschritte unterteilt werden: die Datenverarbeitung, die Bauprozessvorbereitung, das Heizen und Fluten, den Bauprozess, das Abkühlen, die Nachbereitung der Maschine, des Pulvers und der Bauteile. Entsprechend setzt sich die gesamte Fertigungszeit t_{prod} aus den jeweils benötigten Zeiten dieser acht Fertigungsschritte zusammen (siehe Tabelle 8-1 und Formel (8-1)).

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten deutlich wird, beeinflusst die Multimaterialverarbeitung die Prozesskette in mehreren Bereichen. Daher ist es notwendig, das bestehende Modell an verschiedenen Stellen zu verändern oder zu erweitern. Diese sind in Tabelle 11-13 im Anhang zusammengefasst aufgeführt.

Die Zeitmodelle der Prozessschritte der Datenvorbereitung sowie die Dauer des Abkühlens werden durch die Multimaterialverarbeitung im Vergleich zur Monomaterialverarbeitung nicht beeinflusst. Die Vorbereitung der Prozessdaten wird aufgrund der Zuweisung unterschiedlicher Prozessparameter innerhalb eines Bauteils komplexer. Dies hat allerdings keinen Einfluss auf das aufgestellte Modell, sondern beeinflusst vielmehr den benötigten Erfahrungsgrad der Person, die die

Daten vorbereitet, sowie die benötigte Zeitspanne. Bei der Vorbereitung der Anlage muss darauf geachtet werden, dass mindestens zwei Werkstoffe dem Prozess zugeführt werden müssen. Dies hat jedoch auf den zeitlichen Ablauf keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss, weswegen dies vernachlässigt werden kann. Selbiges gilt auch für die Nachbereitung der Maschine und der Bauteile. Daher wird auf diese Prozessschritte nicht weiter eingegangen. Dagegen gibt es insbesondere im Bauprozess sowie bei der Aufbereitung des Pulverwerkstoffs Veränderungen, die im Folgenden näher erläutert werden.

Tabelle 8-1: Fertigungsschritte zur Herstellung eines Multimaterialbauteils mittels LBM

Prozessschritt	Erläuterung	Größe
Datenvorbereitung	Umwandlung der CAD-Bauteildaten in Fertigungsdaten für die LBM-Anlage	t_{DV}
Bauprozessvorbereitung	Vorbereiten und Einbauen der Bauplatte, Einfüllen von Pulver	t_{BV}
Heizen und Fluten	Aufheizen der Bauplatte und Fluten der Anlage mit Schutzgas	t_{HF}
Bauprozess	Fertigung des Bauteils im LBM-Prozess	t_{BP}
Abkühlen	Reduzierung der Temperatur im Bauraum nach Beendigung des Bauprozesses	t_{Ab}
Nachbereitung Maschine	Ausbauen der Bauplatte mit gefertigtem Bauteil	t_{NM}
Nachbereitung Pulver	Aufbereiten des Pulvers nach dem Bauprozess zum Wiedereinsatz	t_{NP}
Nachbereitung Bauteil	Bearbeitung des Bauteils zur Erreichung der Einsatzvoraussetzungen	t_{NB}

$$t_{\text{prod}} = t_{DV} + t_{BV} + t_{HF} + t_{BP} + t_{Ab} + t_{NM} + t_{NP} + t_{NB} \quad (8-1)$$

Bauprozess

Der Einfluss der Auftragsdauer hängt stark mit dem Entwicklungsgrad der LBM-Anlagen zusammen.

Um im Multimaterialprozess die exakte Dauer für den Bauprozess zu bestimmen, muss die Verfestigungsdauer für jeden Werkstoff separat bestimmt werden, da diese abhängig von den jeweiligen Prozessparametern für jeden Werkstoff variiert. Die Berechnung der einzelnen Dauern kann KAMPS ET AL.) entnommen werden. Somit setzt sich die Verfestigungsdauer $t_{V,ges}$ aus der Verfestigungsdauer für die jeweiligen Bereiche A, B und C ($t_{V,A}$, $t_{V,B}$, $t_{V,C}$) (vgl. Abbildung 6-15) zusammen (Formel (8-2)). Besteht ein Bauteil aus weiteren Werkstoffen, müssen diese ebenfalls addiert werden.

$$t_{V,ges} = t_{V,A} + t_{V,B} + t_{V,C} \quad (8-2)$$

Die Zeit für einen zusätzlichen Absaugvorgang muss nicht berücksichtigt werden, da hierzu keine weitere Fahrt des Beschichters notwendig ist. Sie erfolgt während der Positionierung zur Ablage des Materials, welches als Erstes abgelegt werden soll.

Nachbereitung Pulver

Ein wichtiger Aspekt der additiven Fertigung ist die Ressourceneffizienz. Diese ist jedoch nur gegeben, wenn das nicht verfestigte Pulver nach einem Multimaterialprozess wiederverwendet werden kann. Hierzu ist es notwendig, in der Nachbereitung die Pulver verschiedener Materialien wieder voneinander zu separieren. Daher muss auch dieser Prozessschritt in der Kostenkalkulation berücksichtigt werden.

Zunächst wird die Masse ermittelt, die separiert werden muss. Das gesamte wiederaufzubereitende Pulver umfasst das Pulver, das in den Prozess eingebracht wird und nicht verfestigt wird. Das in einem Bauprozess verfestigte Volumen $V_{PV,A/B}$ entspricht dem Bauteilvolumen des jeweiligen Werkstoffs A oder B $V_{BT,A/B}$ und der notwendigen Stützstrukturen $V_{S,A/B}$ für jedes zu fertigende Bauteil. Das Volumen des gesamten verfestigten Pulvers V_{PV} setzt sich aus den Volumen der Werkstoffe A und B zusammen.

$$V_{PV,A/B} = V_{BT,A/B} + V_{S,A/B} \quad (8-3)$$

$$V_{PV} = V_{PV,A} + V_{PV,B} \quad (8-4)$$

Da für einen Multimaterialprozess aufgrund des Absaugvorgangs mehr Ausgangsmaterial benötigt wird, wird ein zusätzlicher Faktor k_{eP} benötigt, welcher diesen Mehrverbrauch im Verhältnis zum nicht verfestigten Pulver im Monomaterialprozess darstellt. Mithilfe von diesem kann nun das Volumen des nicht verfestigten Pulvers bestimmt werden. Er wird mithilfe des Bauraumvolumens und der Anzahl an Schichten bestimmt, die aufgebracht und wieder abgesaugt werden. Wobei Z_{multi} die Anzahl an Multimaterialschichten im gesamten Bauraum beschreibt und Z_{Ab} die Anzahl an Schichten, welche bei jedem Absaugvorgang entfernt werden. Diese Zahl multipliziert mit der Anzahl an Multimaterialschichten ergibt die gesamte Anzahl an entfernten Pulverschichten. Z_B bezeichnet die Schichtzahl des gesamten Bauteils, sodass hier beide Werkstoffe berücksichtigt werden. Multipliziert mit der Schichthöhe und der Grundfläche des Bauraums A_{BF} ergibt sich das gesamte eingebrachte Pulvervolumen. Dieser Faktor wird anteilig abhängig vom Volumen des nicht verfestigten Materials im gesamten Bauraum (V_{BR}) bestimmt.

Die Grundsichten sind die ersten Schichten im Bauteil, an welchen das Bauteil in der Nachbearbeitung abgetrennt wird. Je nach Anzahl der Schichten eines Werkstoffs, sowie Anzahl der Schichten, die abgesaugt werden, kann nicht die volle Anzahl an Schichten entfernt werden. Dies ist vor allem für den Anfang eines Bauprozesses relevant, wenn die ersten Schichten aufgebracht werden. Dies wird mit dem Korrekturfaktor k_{Ab} berücksichtigt. Tabelle 8-2 zeigt exemplarisch die Korrekturfaktoren für die Fälle der Absaugung von ein bis vier Schichten.

Tabelle 8-2: Korrekturfaktor k_{Ab} für die Grundsichten

Abgesaugte Schichten Z_{Ab}	Korrekturfaktor k_{Ab}
1	0
2	1
3	3
4	6

Da nur der Anteil von Interesse ist, der zusätzlich eingebracht wird, kann das verfestigte Bauteilvolumen subtrahiert werden. Mit diesen Informationen kann nun der Korrekturfaktor k_{eP} berechnet werden (Formel (8-5)).

$$k_{eP} = \frac{(Z_{multi} \cdot Z_{Ab} - k_{Ab} + Z_B) \cdot h_s \cdot A_{BF} \cdot V_{PV}}{V_{BR} - V_{PV}} \quad (8-5)$$

Mithilfe dieses Werts kann nun das Volumen des Pulvers $V_{P,Auf}$ berechnet werden, welches aufbereitet werden muss. Es entspricht dem nicht verfestigten Pulver, das in den Prozess eingebracht wurde.

$$V_{P,Auf} = k_{eP} \cdot (V_{BR} - V_{PV}) \quad (8-6)$$

Im nächsten Schritt wird nun die Masse des Pulvers m_{Pauf} ermittelt, die getrennt werden muss. Um diese berechnen zu können, muss die Verteilung der beiden Werkstoffe bekannt sein. Wird mehr als nur eine Pulverschicht abgesaugt, bzw. sind im Bauteil Monomaterialbereiche vorhanden, ist diese Verteilung nicht mehr gleichmäßig, sondern muss anteilig, jeweils im Bauraum (m_{PBR}) und in der Saugereinheit (m_s) bestimmt werden. Ein möglicher Aufbau eines solchen Multimaterialbauteils ist in Abbildung 8-2 zu sehen.

$$m_{Pauf} = m_{PBR} + m_s \quad (8-7)$$

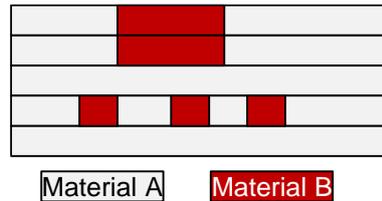


Abbildung 8-2: Beispielhafter Aufbau eines Multimaterialbauteils

Die Pulverzusammensetzung ist für den Bauraum und die Saugereinheit unterschiedlich und wird daher im Folgenden getrennt betrachtet.

1. Pulverzusammensetzung im Bauraum

Das Volumen des Pulvers im Bauraum V_{PBR} entspricht dem Bauraumvolumen V_{BR} abzüglich des verfestigten Pulvers V_{PV} .

$$V_{PBR} = V_{BR} - V_{PV} \quad (8-8)$$

Da in einem Bauteil auch Monomaterialbereiche enthalten sein können, ergibt sich durch Addition der Massen für jeden Bauteilbereich die Masse des Pulvers im Bauraum m_{PBR} . Um diese zu bestimmen, werden die Volumenanteile im Bauraum der Bauteilbereiche ($V_{PBE,M}$, $V_{PBE,A}$, $V_{PBE,B}$) mit der entsprechenden Dichte addiert.

$$m_{PBR} = V_{PBR} \cdot \left(\rho_B \cdot \frac{V_{PBR,M}}{V_{PBR}} + \rho_A \cdot \frac{V_{PBR,A}}{V_{PBR}} \cdot \frac{z_A - z_{Ab} + 1}{z_A} + \right) \quad (8-9)$$

$$\rho_B \cdot \frac{V_{PBR,B}}{V_{PBR}} \cdot \frac{z_B - z_{Ab} + 1}{z_B}$$

Es wird davon ausgegangen, dass in Multimaterialbereichen Werkstoff B im Bauraum verbleibt. Damit Bereiche entstehen können, in welchen Werkstoff A als Monomaterial vorkommt, müssen diese Bereiche mindestens eine Schicht mehr aufweisen, als durch das Absaugmodul entfernt wird.

Die einzelnen Volumenbereiche des nicht verfestigten reinen Pulvers A und B errechnen sich über die Fläche des Bauraums A_{BF} und der Höhe des jeweiligen Monomaterialbereichs abzüglich der verfestigten Monomaterialbereiche. Diese können über das Verhältnis von benötigten Schichten und Gesamtvolumen des Bauteils (V_{BT}) bestimmt werden.

$$V_{PBR,A/B} = A_{BF} \cdot z_{A/B} \cdot h_s - \frac{z_{A/B}}{z_{ges}} \cdot V_{BT} \quad (8-10)$$

Das gesamte Volumen des unverfestigten Pulvers der Multimaterialschichten im Bauraum entspricht der Differenz des Bauraumvolumens und der Monomaterialbereiche.

$$V_{PBRM} = V_{BR} - (V_{PBRA} + V_{PBRB}) \quad (8-11)$$

2. Pulverzusammensetzung in der Saugereinheit

Das Volumen des Pulvers in der Saugereinheit (V_{PAb}) umfasst das ganze Pulver, das in den Prozess eingebracht wurde, aber nicht im Bauraum ist.

$$V_{PAb} = V_{PAuf} - V_{PBR} \quad (8-12)$$

Die Zusammensetzung und damit die Dichte des Pulvers ist zum einen abhängig von der Anzahl der Schichten, die vom jeweiligen Material abgesaugt werden. Zum anderen auch von der Verteilung der Materialbereiche im Bauteil (V_{BTM} , V_{BTA} , V_{BTB}). Unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors k_V , welcher Pulververluste infolge des Absaugens berücksichtigt, kann die Masse des Pulvers in der Saugereinheit m_s bestimmt werden.

$$m_s = V_{PAb} \cdot k_V \cdot \left[\left(\frac{1}{z_s} \cdot \rho_A + \frac{z_s - 1}{z_s} \cdot \rho_B \right) \cdot \frac{V_{PBRM} - V_{BTM}}{V_{PAb}} + \rho_A \cdot \frac{V_{PBRA} - V_{BTA}}{V_{Ab}} \cdot \frac{z_s - 1}{z_A} + \rho_B \cdot \frac{V_{PBRB} - V_{BTB}}{V_{Ab}} \cdot \frac{1}{z_B} \right] \quad (8-13)$$

Aus den beiden bestimmten Pulvermassen aus dem Bauraum m_{PBR} und der Saug-einheit m_s , kann die Pulvermenge m_{Auf} bestimmt werden, die in der Nachbearbei-tung aufbereitet werden muss.

$$m_{\text{Auf}} = m_{\text{PBR}} + m_s \quad (8-14)$$

Die so ermittelte Menge an Pulver muss nun zunächst gesiebt und anschließend getrennt werden. Hieraus lässt sich nun die Dauer für die Nachbereitung t_{NP} des Pulvers ableiten. Diese lassen sich aus den Sieb- bzw. Trennraten r_s und r_T berech-nen. Es muss jedoch bedacht werden, dass beim Sieben Pulververluste k_s entste-hen, wodurch sich die Masse des zu separierenden Pulvers reduziert. Zusätzlich wird Zeit benötigt, um den Sieb- und Trennvorgang durchzuführen. Diese werden in der Dauer t_{HS} und t_{HT} berücksichtigt.

$$t_{\text{NP}} = \frac{m_{\text{Auf}}}{r_s} + \frac{m_{\text{Auf}} \cdot (1 - k_s)}{r_T} + t_{\text{HS}} + t_{\text{HT}} \quad (8-15)$$

8.1.1.2 Stundensätze

Um abschließend das Multimaterial-Kostenmodell zusammensetzen zu können, werden nachfolgend noch die Maschinen- sowie Mitarbeiterstundensätze be-stimmt.

Maschinenstundensatz

Unter Nutzung des Vorgehens aus GOMERINGER ET AL. (2017) sowie der im An-hang in Tabelle 11-17 aufgeführten Werte ergibt sich ein Maschinenstundensatz $K_{\text{Be,LBM}}$ von $22,02 \frac{\text{Euro}}{\text{Stunde}}$. Für die Vor- bzw. Nachbereitung der Anlage resultiert ein reduzierter Stundensatz von $K_{\text{SB,LBM}}$ $21,72 \frac{\text{Euro}}{\text{Stunde}}$, da davon ausgegangen wird, dass der Laser ca. 50 % der Energie im Fertigungsprozess benötigt.

Dasselbe Vorgehen sowie die Daten aus Tabelle 11-18 aus dem Anhang wurden zur Berechnung des Maschinenstundensatzes zur Nachbearbeitung des Pulver-werkstoffs K_{NP} genutzt. Dieser umfasst sowohl den Trennvorgang als auch das Sieben und beläuft sich auf einen Wert von $13,10 \frac{\text{Euro}}{\text{Stunde}}$.

Mitarbeiterstundensatz

Aufgrund der hohen Vorkenntnisse bzgl. Arbeitssicherheit, CAD-Programmen, Vorbereitung der Anlage etc. wird ein erhöhter Stundensatz von $21 \frac{\text{Euro}}{\text{Stunde}}$ für einen

Anlagenbediener angenommen. Die weiteren Kosten berechnen sich prozentual aus diesem Wert und können Tabelle 11-19 im Anhang entnommen werden. Auf dieser Grundlage ergibt sich ein Stundenlohn von brutto $39,49 \frac{\text{Euro}}{\text{Stunde}}$.

Für einen Ingenieur wird ein Grundlohn von $37 \frac{\text{Euro}}{\text{Stunde}}$ angenommen (OTT 2012). Auf entsprechende Weise entsteht ein Bruttolohn von $69,57 \frac{\text{Euro}}{\text{Stunde}}$ (siehe Anhang Tabelle 11-20).

8.1.1.3 Zusammengesetztes Kostenmodell

Mithilfe der ermittelten Zeitmodelle sowie der bestimmten durchschnittlichen Stundensätze können nun die Betriebskosten bestimmt werden. Diese setzen sich aus den Maschinenkosten für die LBM-Anlage K_{LBM} , den Materialkosten K_{M} und den Mitarbeiterkosten K_{MA} zusammen.

$$K_{\text{ges}} = K_{\text{LBM}} + K_{\text{M}} + K_{\text{MA}} \quad (8-16)$$

LBM-Kosten

Die Kosten für den Betrieb einer LBM-Anlage setzen sich aus den Kostensätzen für den aktiven Betrieb $K_{\text{BE,LBM}}$ und den Stand-by-Modus der Anlage $K_{\text{SB,LBM}}$ sowie den entsprechenden Einsatzzeiten für den Betrieb der Anlage t_{BP} und die Vorbereitung der Anlage t_{BV} , das Fluten und Vorheizen der Anlage t_{FH} , das Abkühlen nach dem Bauprozess t_{Ab} sowie das Nachbereiten der Anlage t_{NB} zusammen.

$$K_{\text{LBM}} = K_{\text{BE,LBM}} \cdot t_{\text{BP}} + K_{\text{SB,LBM}} \cdot (t_{\text{BV}} + t_{\text{FH}} + t_{\text{Ab}} + t_{\text{NM}}) \quad (8-17)$$

Materialkosten

Die Materialkosten ergeben sich aus den Kosten für das Pulver K_{P} , den Kosten für das Schutzgas K_{S} , die Druckluft K_{L} und die Substratplatte K_{SP} .

Das Vorgehen zur Ermittlung der Kosten für das Schutzgas, die Druckluft sowie die Substratplatte können dem Modell von KAMPS ET AL. (2018) entnommen werden.

Bei der Bestimmung der Pulverkosten müssen auf der einen Seite Pulververluste berücksichtigt werden, die beim Sieben und Separieren entstehen. Darüber hinaus muss mit einem fixen Verlust m_{VP} pro Bauprozess gerechnet werden. Dieses Pulver versinkt in offene Spalten, beispielsweise zwischen Bauplatte und Hubeinheit. Auf der anderen Seite muss ein Mehrverbrauch einkalkuliert werden, um einen

sicheren Pulverauftrag zu gewährleisten. Dies hat zur Folge, dass bei jedem Schichtauftrag ein bestimmter Prozentsatz mehr mit aufgetragen werden muss, welcher in die Überlaufbehälter der Anlage gefördert wird. Dieser Anteil wird in Form eines Sicherheitsfaktors S_P berücksichtigt. Daher muss insgesamt die Menge $m_{K,A/B}$ beschafft werden.

$$m_K = [m_{VP} + (k_s + k_T) \cdot m_{P,Auf}] \cdot S_P \quad (8-18)$$

Diese Menge muss bei der Kalkulation der Materialpreise ($P_{A/B}$) anteilig des jeweiligen Werkstoffs berücksichtigt werden. Diese Anteile entsprechen der Summe des jeweiligen Materials im Bauraum und in der Absaugung.

$$m_{K,A} = \rho_A \cdot \left[\left(\frac{V_{PBR,A} - V_{BT,A}}{V_{Ab}} \cdot \frac{z_s - 1}{z_A} + \frac{1}{z_s} \cdot \frac{V_{PBR,M} - V_{BT,M}}{V_{PAb}} \right) \cdot V_{P,Ab} \cdot k_V + V_{PBR,A} \right] \quad (8-19)$$

$$m_{K,B} = \rho_B \cdot \left[\left(\frac{V_{PBR,B} - V_{BT,B}}{V_{Ab}} \cdot \frac{1}{z_B} + \frac{z_s - 1}{z_s} \cdot \frac{V_{PBR,M} - V_{BT,M}}{V_{PAb}} \right) \cdot V_{P,Ab} \cdot k_V + V_{PBR,B} \right] \quad (8-20)$$

$$K_P = m_{K,A} \cdot P_A + m_{K,B} \cdot P_B \quad (8-21)$$

8.1.2 Diskussion des Modells

Bei dem aufgezeigten Modell kann es zu Abweichungen von den in der Realität auftretenden Mengen kommen. Diese können verschiedene Ursachen haben, welche nachfolgend erörtert werden.

Es wurde die Tatsache berücksichtigt, dass in einem Bauteil sowohl Monomaterial- als auch Multimaterialbereiche existieren können. Hierdurch ist es notwendig, das gesamte nicht verfestigte Pulver sowohl aus Bauraum als auch in der Saugereinheit wiederaufzubereiten.

Für Teilprozesse existieren momentan keine industriellen Anlagen. Derzeit kommen vor allem prototypische Versuchsstände zum Einsatz, wodurch ein Mehraufwand oder eine Erhöhung von Verlusten durch einen verminderten Automatisierungsgrad entstehen können. Darüber hinaus wird in diesem Modell von einer kon-

stanten Schüttdichte der Werkstoffe ausgegangen. Auch hier können Abweichungen je nach Werkstoff entstehen, wodurch Differenzen zum realen Bedarf des Materials entstehen können.

Aufgrund des hohen Innovationsgrades dieses Prozesses werden erhöhte Personalkosten für die Ingenieure und Techniker kalkuliert, die an verschiedenen Stellen der Prozesskette zum Einsatz kommen.

8.2 Szenarienanalyse zur Beurteilung Wirtschaftlichkeit

Auf Basis des gezeigten Modells erfolgt beispielhaft eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand der Fertigung eines Referenzbauteils. Ziel ist es, eine Aussage zu treffen, welche Prozessschritte besonders kostenintensiv sind. Hierdurch können Aussagen abgeleitet werden, in welchen Bereichen ein hoher Handlungsbedarf besteht, damit die Multimaterialverarbeitung zeitnah im industriellen Umfeld eingesetzt werden kann.

8.2.1 Referenzbauteil

Die Analyse der Prozesskette erfolgt anhand desselben Bauteils wie in Abschnitt 4.4. Hierbei handelt es sich um ein zylindrisches Bauteil, das in einem Spritzgusswerkzeug als Angusstutzen zum Einsatz kommt. Dieses Werkzeug wird mit 96 Kavitäten gefertigt, weswegen 96 Angusstutzen pro Werkzeug benötigt werden. Vier weitere werden als Rücklageexemplare benötigt, sodass sich der gesamte Bedarf auf 100 Stück beläuft.

Konventionell wird das Bauteil entsprechend der in Abbildung 8-3 gezeigten Prozesskette gefertigt. Der Rohling wird nach einer mechanischen Bearbeitung in Form von Drehen, Erodieren und Bohren mit einer Nickelschicht überzogen, um eine hinreichend gute Verschleißfestigkeit der Oberfläche zu gewährleisten.

Die Kosten für die Fertigung durch additive Multimaterialverfahren ergeben sich entlang der in Abbildung 8-4 dargestellten Prozesskette. Aufbauend auf einem konventionell gefertigten Rohteil wird im additiven Multimaterialprozess das restliche Bauteil hergestellt. Neben der eigentlichen Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen muss das Rohteil noch wärmenachbehandelt und anschließend mechanisch bearbeitet werden, sodass das Bauteil anforderungsgerechte mechanische Eigenschaften und alle Funktionsflächen eine ausreichende Oberflächenqualität aufweisen.

8.2 Szenarienanalyse zur Beurteilung Wirtschaftlichkeit

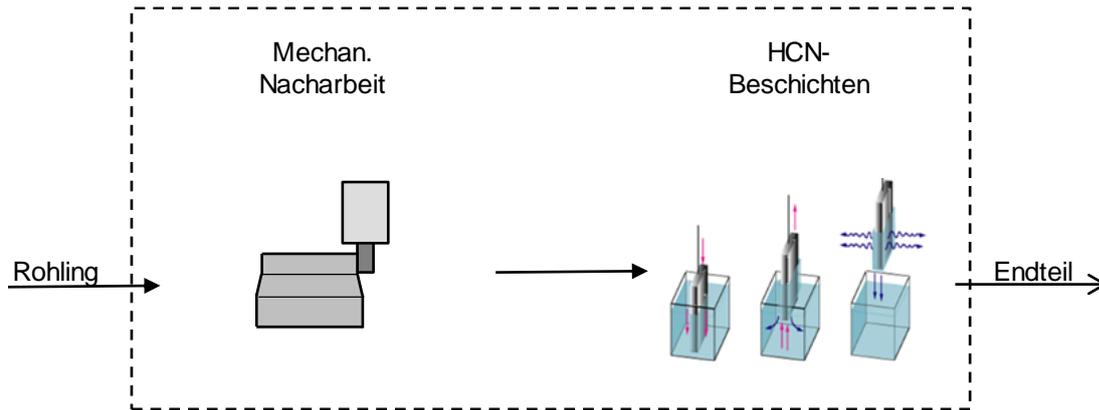


Abbildung 8-3: Fertigungsprozesskette der konventionellen Fertigung des Referenzbauteils (Quelle: Firma Schmelzmetall)

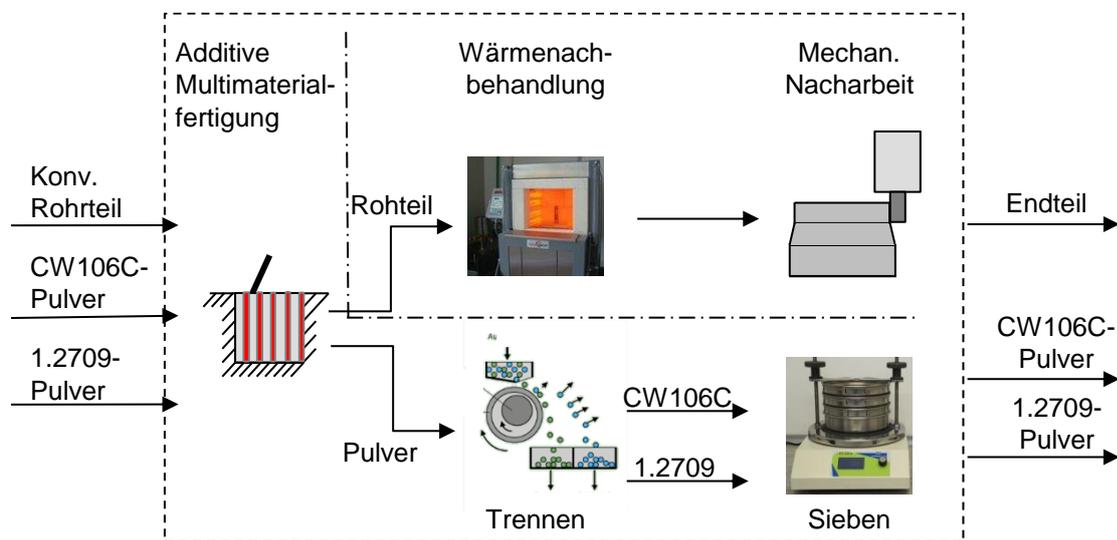


Abbildung 8-4: Fertigungsprozesskette der additiven Multimaterialfertigung des Referenzbauteils

8.2.2 Betrachtete Szenarien

Zur Bestimmung der Auftragsraten wurden die Prozessparameter verwendet, welche in dieser Arbeit zur Verarbeitung von Werkzeugstahl 1.2709 und der Kupferlegierung eingesetzt wurden. Aufgrund der Materialeigenschaften kann davon ausgegangen werden, dass ein Pulvergemisch nach dem Fertigungsprozess wieder getrennt werden kann (vgl. Abschnitt 5.3).

Das erste Szenario spiegelt die aktuelle *Ist-Situation* wider. Sie entspricht dem Stand, wie er in dieser Arbeit umgesetzt ist. Das heißt, dass eine Baufläche von $48 \cdot 48 \text{ mm}^2$ zur Verfügung steht. Auch entsprechen die Dauern zum Auftragen und Entfernen mit 17 bzw. 18 Sekunden der derzeitigen Situation. Die Schichthöhe, um einen zuverlässigen Prozess zu gewährleisten, bei welchem auch die aufgetragene Pulverschicht wieder entfernt werden kann, beträgt $30 \text{ }\mu\text{m}$. Aufgrund der prototypischen Umsetzung ist der Automatisierungsgrad bei allen Prozessschritten gering, wodurch es verstärkt zu Pulververlusten kommt. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Aufwendungen zur Nachbearbeitung des hergestellten Bauteils entsprechend denen der konventionellen Fertigung sind. Dies ist im erstmaligen Einsatz dieser Technologie begründet, weswegen zusätzliche Unsicherheiten infolge einer Abweichung der konventionellen Prozesskette vermieden werden sollen.

Das zweite Szenario entspricht der Situation, die bei einer industriellen Umsetzung der jetzigen *Ist-Situation* möglich wäre. Das heißt, dass die Verfahzeiten verkürzt werden können. Gründe für diese Verkürzung sind zum einen die Entkoppelung des Auftrags- und Entfernungsvorgangs, sodass diese nun unterschiedlich schnell erfolgen können. Zum anderen kann die Absaugleistung durch eine stärkere Pumpe oder Ähnliches erreicht werden. Auf diese Weise kann auch der Entfernungsvorgang schneller durchgeführt werden. Aufgrund der noch geringen Nachfrage wird davon ausgegangen, dass das Konzept zunächst auf einer Small-Size-Anlage mit einer Baufläche von $125 \cdot 125 \text{ mm}^2$ umgesetzt wird.

Das dritte Szenario beschreibt die Umsetzung in einer industriellen Großanlage. In diesem großindustriellen Szenario verfügt die Anlage über ein entsprechendes Überwachungstool, das zum einen den Pulverauftrag, ebenso wie das Entfernen des Pulvers überwacht. Aufgrund der größeren industriellen Umsetzung können größere Pulvermengen beschafft werden, wodurch sich niedrigere Materialkosten ergeben. Ebenso kann von einer hohen Automatisierung ausgegangen werden, wodurch weniger Pulververluste entstehen. Durch eine weitere Optimierung des Absaugmoduls ist es in diesem Szenario auch möglich, Bauteile mit $50 \text{ }\mu\text{m}$ hohen Schichten zu fertigen. Zusätzlich kann die Fertigungszeit durch den Einsatz mehrerer Laser verkürzt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass aufgrund des größeren Bauraums längere Dauern zum Auftragen und Entfernen einer Pulverschicht entstehen. Um die gesteigerte Nachfrage widerzuspiegeln, wird eine Stückzahl von 1000 angenommen.

8.2 Szenarienanalyse zur Beurteilung Wirtschaftlichkeit

Eine Übersicht über die Randbedingungen der drei Szenarien ist in Tabelle 8-3 zu finden.

Tabelle 8-3: Übersicht über die betrachteten Szenarien im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

	Prototypisches Ist-Szenario	Industrielles Ist-Szenario	Großindustriel- les Szenario
Stückzahlen	100	100	1000
Automatisierungsgrad	Niedrig	Niedrig	Hoch
Verwendete Anlage	SLM 250 HL	SLM 125 HL	Concept Laser X Line 2000 R
Prozessüberwachung	Nein	Nein	Ja
Abgesaugte Pulvermenge	1 Schicht	1 Schicht	1 Schicht
Schichthöhe	30 µm	30 µm	50 µm
Auftragsdauer	17 sec	8 sec	10 sec
Entfernungsdauer	18 sec	12 sec	15 sec
Pulverkosten	CW106C	200 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$	155 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$
	1.2709	72 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$	59 $\frac{\text{€}}{\text{kg}}$

8.2.3 Vergleich der Szenarien

Der Vergleich der Herstellungskosten in den Szenarien zeigt deutlich den Einfluss einer Weiterentwicklung des Verfahrens, wie aus Tabelle 8-4 erkenntlich wird.

Größte Einflussfaktoren auf die Kosten der additiven Fertigungsszenarien sind die Materialkosten und hier insbesondere die Pulverkosten (siehe Abbildung 8-5). Zusätzlich werden in den Materialkosten Aufwände für Druckluft und Schutzgas mitberücksichtigt. Die hohen Kosten für das Pulver entstehen zum einen durch den hohen Preis für das CW106C-Pulver. Aufgrund der bisher noch geringen Nachfrage ist diese Legierung kein Standardprodukt für die additive Fertigung. Dies macht Sondervedüsungen notwendig, welche höhere Herstellungskosten zur

8.2 Szenarienanalyse zur Beurteilung Wirtschaftlichkeit

Folge haben und somit auch den Preis für das Endprodukt erhöhen. In den letzten Jahren konnte bereits für andere Werk

Tabelle 8-4: Vergleich der Fertigungskosten für ein Bauteil und einen Bauprozess bei unterschiedlichen Fertigungsszenarien

	Einheit	Prototypisches Ist-Szenario	Industrielles Ist-Szenario	Großindustrielles Szenario
Kosten für ein Bauteil	$\frac{\text{€}}{\text{Stk}}$	807,91	155,00	52,79
Bauteile pro Bauprozess	-	1	4	50
Kosten pro Bauprozess	€	807,91	619,99	2.639,56

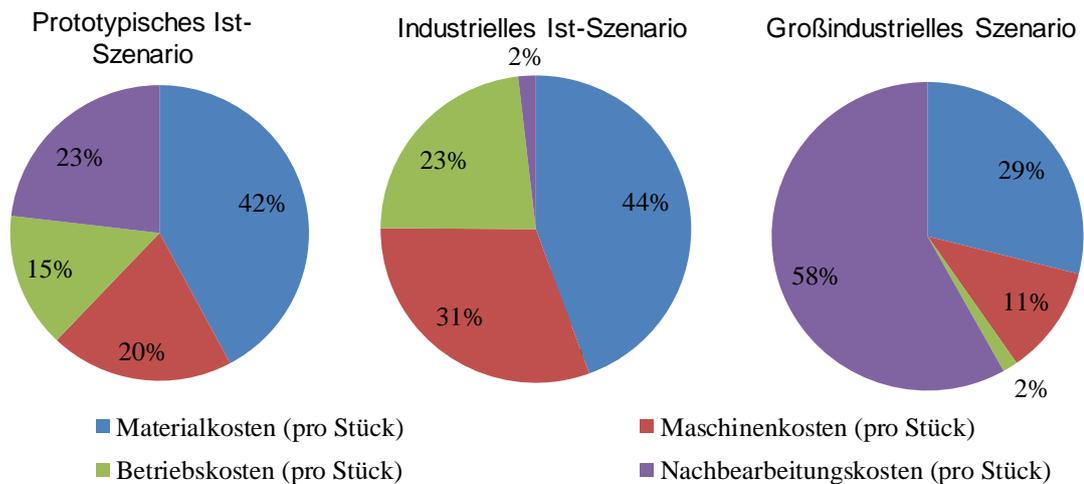


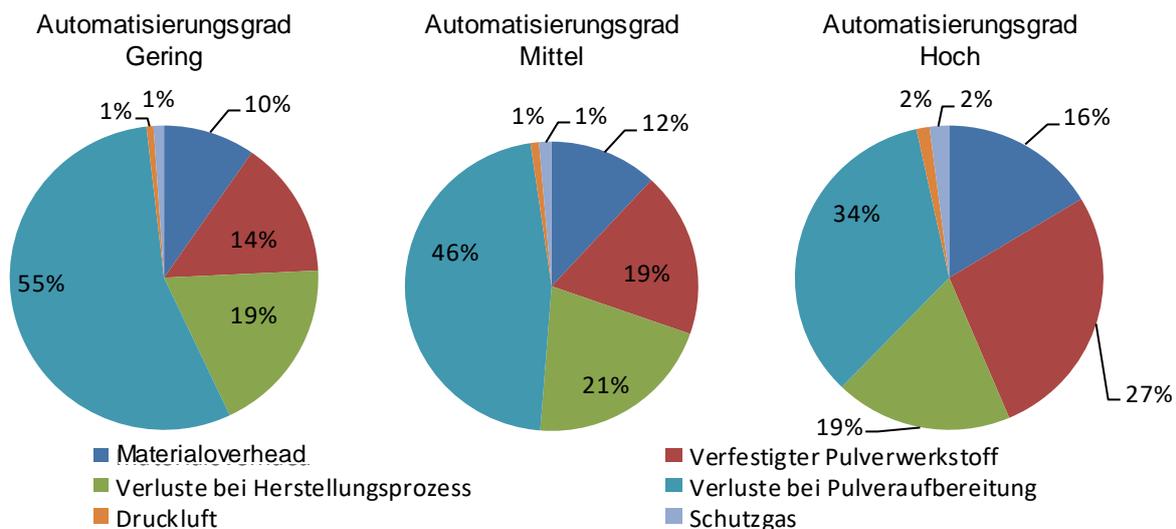
Abbildung 8-5: Vergleich der Produktionskosten pro Stück bei unterschiedlichen Fertigungsszenarien

stoffe die Tendenz beobachtet werden, dass der Pulverpreis infolge größerer Produktionsmengen sowie einer Steigerung der Anzahl an Anbietern auf dem Markt gesunken ist (LANGFELD ET AL. 2016). Diese Entwicklung wird auch für die Verarbeitung der Kupferlegierung CW106C angenommen. Aufgrund der bereits weiten Verbreitung des Werkzeugstahls ist für diesen Werkstoff eine solche Entwicklung nicht zu erwarten.

8.2 Szenarienanalyse zur Beurteilung Wirtschaftlichkeit

Zusätzlich können die Materialkosten durch eine höhere Automatisierung der Prozesskette gesenkt werden. Dies bewirkt eine Reduzierung der Pulververluste vor allem beim Separieren der Werkstoffe im Rahmen der Aufbereitung der Pulver (vgl. Abbildung 8-6).

Der Vergleich unterschiedlicher Automatisierungsgrade zeigt deutlich den Einfluss vor allem auf die Materialverluste. Diese können bei einem geschlossenen und vollautomatisierten Pulveraufbereitungskonzept von 55 % auf 34 % reduziert werden. Das zeigt die Notwendigkeit, im Bereich der Pulveraufbereitung Kon-



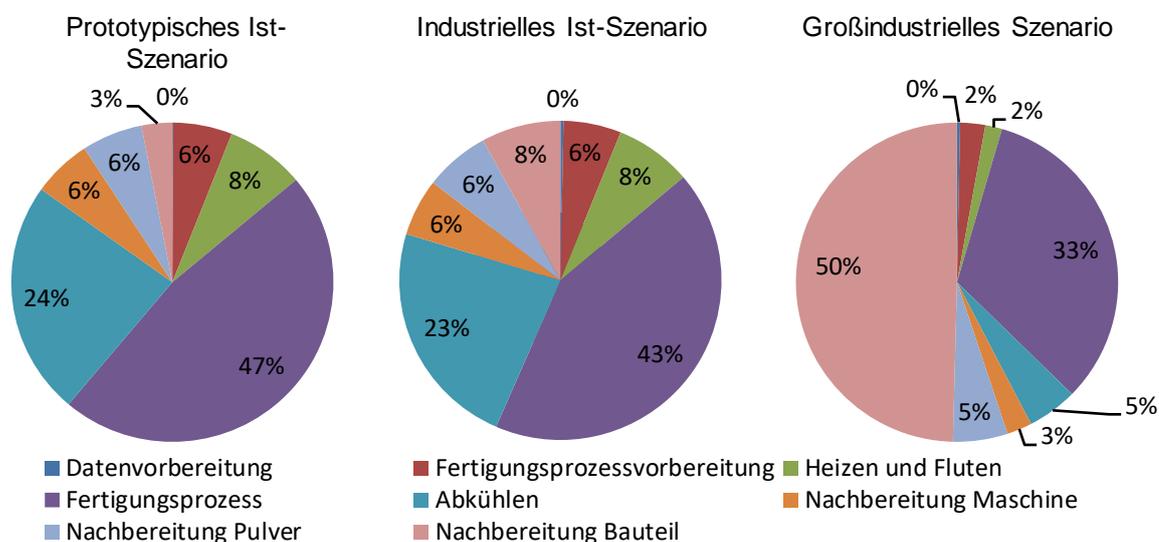
zepte zu entwickeln, welche keinen oder nur einen geringen Anteil an manuellen Tätigkeiten benötigen.

Abbildung 8-6: Materialverluste im Rahmen der Pulveraufbereitung am Beispiel des industriellen Ist-Szenarios mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden

Als zweitgrößter Faktor bei den Produktionskosten lassen sich die Maschinenkosten identifizieren. Diese werden hauptsächlich durch die langen Fertigungsprozesszeiten bestimmt (siehe Abbildung 8-7). Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit und des geringen Absorptionsgrades der Laserenergie durch die Kupferlegierung kann der Laser nur mit einer geringen Belichtungsgeschwindigkeit verfahren, wodurch die Dauer des Bauprozesses steigt. Die im großindustriellen Szenario angenommene Multilaser-Anlage bewirkt bereits eine deutliche Reduzierung der relativen Bauzeit von im theoretischen Ist-Szenario $1,38 \frac{\text{h}}{\text{Stk}}$ auf $0,25 \frac{\text{h}}{\text{Stk}}$. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Prozessparameter unter dem Aspekt der maximalen Aufbaurate zu optimieren und ggf. auch Laserquellen mit einer höheren Leistung

8.2 Szenarienanalyse zur Beurteilung Wirtschaftlichkeit

oder anderen Wellenlänge einzusetzen. Hierdurch können Belichtungsgeschwindigkeiten, beispielsweise infolge einer verbesserten Absorption der Photonen



durch den Werkstoff, gesteigert werden. Es ist jedoch zu beachten, dass eine solche Anlage höhere Anschaffungskosten zur Folge hat.

Abbildung 8-7: Zusammensetzung der Fertigungsdauern pro Stück

Ein prozentual wachsender Einfluss mit zunehmender Entwicklung der Technologie kommt den Kosten für die Nachbearbeitung zu. In den angenommenen Szenarien bleiben die Aufwände für die Nachbearbeitung konstant, da diese bereits heute einen sehr hohen Automatisierungsgrad aufweisen und somit nur noch wenig Potenzial für einen optimierten Prozessablauf bieten.

Eine Reduzierung des Nachbearbeitungsaufwands könnte beispielsweise durch ein additiv gerechtes Bauteildesign erreicht werden, welche alle Potenziale ausnützt, die infolge der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen entstehen. Mithilfe eines solchen Bauteildesigns können nachgelagerte Prozessschritte, wie beispielsweise das Erodieren von Kühlkanälen entfallen. Auch kann ggf. die Wärmenachbehandlung auf einen Härteprozessschritt reduziert oder der Zeit-Temperatur-Verlauf verkürzt werden. Dies konnte bereits für die Verarbeitung von EN AC-43400 und X5CrNiCuNb16-4 nachgewiesen werden (ROWOLT ET AL. 2017).

Der Anteil der additiven Fertigungsdauer pro Stück kann deutlich reduziert werden. Dies wird zum einen durch ein optimiertes Multimaterialauftragskonzept erreicht, da hier die Dauern für das Entfernen des Pulvermaterials verkürzt werden können. Dies ergibt sich aus Tabelle 8-5 im Vergleich der Herstellungsdauern für

das prototypische und industrielle Ist-Szenario. Im großindustriellen Szenario ergibt sich zunächst eine Verlängerung der absoluten Fertigungszeit. Es muss jedoch bedacht werden, dass in diesem Fall die zehnfache Menge hergestellt wird. Dennoch unterscheiden sich die Herstellungsdauern für den gesamten Bauauftrag der beiden industriellen Szenarien um lediglich 36 %. Im großindustriellen Szenario können in einem Bauprozess 91 Stück gefertigt werden, während im industriellen Ist-Szenario vier Stück gleichzeitig produziert werden. Um den gesamten Bauauftrag herstellen zu können, sind somit für das industrielle Ist-Szenario 25 Bauprozesse und 11 für das großindustrielle Szenario notwendig. Diese Entwicklung kann auf Skaleneffekte zurückgeführt werden, aufgrund derer größere Umfänge in relativ kürzerer Zeit hergestellt werden können, beispielsweise infolge von höheren Automatisierungsgraden, Wiederholaufträgen sowie einer effizienten Ausnutzung größerer Bauräume.

Gleichzeitig kann eine Verkürzung der Verfestigungszeit durch den Einsatz mehrerer Laser bewirkt werden. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Bereiche simultan verfestigen, was eine Reduzierung der Verfestigungsdauer entsprechend der Anzahl an eingesetzten Lasern bewirkt.

Tabelle 8-5: Vergleich der Herstellungsdauer im additiven Fertigungsprozess für einen Bauprozess und den gesamten Bauauftrag bei unterschiedlichen Fertigungsszenarien

	Einheit	Prototypisches Ist-Szenario	Industrielles Ist-Szenario	Großindustrielles Szenario
Herstellungsdauer pro Bauprozess	h	5,97	5,53	19,51
Herstellungsdauer für ganzen Auftrag	h	596,71	138,33	214,62

8.3 Technologische Potenziale

Neben den wirtschaftlichen Aspekten kann ein Mehrwert neuer Fertigungstechnologien auch durch die Umsetzung neuer technischer Potenziale geschaffen werden.

Zum einen können die Eigenschaften der Bauteile durch den Einsatz von unterschiedlichen Werkstoffen optimiert werden. So kann durch den gezielten Einsatz von Leichtbauwerkstoffen die Masse deutlich reduziert werden. Um die mechanischen Anforderungen zu erfüllen, können an den entsprechend beanspruchten Bereichen andere Werkstoffe eingesetzt werden. Auf diese Weise bleibt die Funktion erhalten.

Ein anderer Ansatz hierfür ist der gezielte Einsatz von Legierungselementen, mit welchen die Eigenschaften eines Grundwerkstoffs in verschiedenen Bereichen beeinflusst werden können. Man spricht hierbei von In-Situ-Legieren. Das gleiche Vorgehen wie zur Erzeugung von unterschiedlichen Legierungen oder Werkstoffverbänden lässt sich auch für die Herstellung von gradierten Werkstoffübergängen einsetzen. In diesem Fall erfolgt ein Werkstoffwechsel von einem Werkstoff zu einem anderen kontinuierlich über einen definierten Bereich hinweg. Mithilfe der additiven Multimaterialverarbeitung ist es möglich, gezielt Mischungsverhältnisse einzustellen und auf diese Weise kritische Konzentrationen, welche beispielsweise die Ausbildung spröder Phasen zur Folge hätten, zu vermeiden oder zu minimieren. So können auch Werkstoffe in einem Bauteil verwendet werden, die bisher nicht stoffschlüssig miteinander verbunden werden konnten.

Mithilfe der Integration von mehreren Werkstoffen in einem Bauteil ist es des Weiteren möglich, elektrisch leitfähige Bereiche zu integrieren. Auf diese Weise ist es möglich, Sensoren zu fertigen, mit welchen der Bauteilzustand sowohl bei beispielsweise nachgelagerten Prozessschritten als auch im Einsatz des fertigen Bauteils überwacht werden kann. Dies ermöglicht es, Wartungsarbeiten zu minimieren oder ein Versagen des Bauteils infolge einer Überschreitung eines kritischen Betriebszustands vorhersagen zu können. Langfristig kann auf diese Weise die Standzeit von Bauteilen erhöht und das mechanische oder thermische Potenzial von Komponenten weiter ausgereizt werden.

Auch im Bereich der Monomaterialbauteile werden durch einen Multimaterialprozess neue Möglichkeiten geschaffen. Indem beispielsweise für Supportstrukturen gezielt Werkstoffe eingesetzt werden, die mithilfe von Lösungsmitteln entfernt werden können, ohne dass das Bauteilmaterial angegriffen wird, können derzeit existierende Fertigungsrestriktionen minimiert werden. Somit muss die Zugänglichkeit für Werkzeuge nicht mehr gegeben sein, wodurch eine höhere Komplexität in Form von Hinterschneidungen oder der Führung von innenliegenden Hohlstrukturen möglich ist.

8.4 Fazit

Es wurde ein Modell zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Multimaterialbauteilen entwickelt. Hierzu wurde der In-Prozess eines bestehenden Ansatzes zur Herstellung von Monomaterialbauteilen im LBM-Verfahren um die Prozessschritte des Pulverentfernens sowie die zusätzliche Beschichtung und Materialbelichtung ergänzt. Darüber hinaus wurde in der Nachbereitung ein Modell zur Bestimmung der Pulvermengen ergänzt, welche nach der Fertigung erst getrennt und anschließend gesiebt werden. Mittels dieses Modells wurde die Multimaterialverarbeitung hinsichtlich Kostentreibern anhand eines Beispiels analysiert.

Die größten Kosten entstehen infolge der hohen Materialkosten für die Pulverwerkstoffe. Um diese zu senken, müssen vor allem die Verluste in der Nachbereitung reduziert werden. Dies kann durch einen höheren Automatisierungsgrad erreicht werden. Eine weitere Reduzierung kann durch sinkende Werkstoffpreise infolge einer höheren Nachfrage bewirkt werden.

Der zweithöchste Kostenpunkt sind die Maschinenkosten. Hier sind vor allem die langen Fertigungsdauern infolge der geringen Belichtungsgeschwindigkeit beim Aufschmelzen der Kupferlegierung CW106C ausschlaggebend. Durch den Einsatz von Mehrlaser-Technologien und von Lasern mit unterschiedlichen Wellenlängenbereichen kann die Prozessdauer des Laserstrahlschmelzprozesses deutlich reduziert werden.

Diese Herstellung von Multimaterialbauteilen mittels Laserstrahlschmelzen bietet auch neue technologische Möglichkeiten. Diese erstrecken sich von lokal einstellbaren Werkstoffeigenschaften über neue Konstruktionsmöglichkeiten bis hin zur Fertigung von Sensoren zur integrierten Bauteilüberwachung.

9 Schlussbetrachtung

9.1 Zusammenfassung

Im Laserstrahlschmelzen wird das Pulver mittels eines Beschichters in dem Bauroum in homogenen Schichten über die gesamte Baufläche verteilt. Dieses Beschichter-Konzept limitiert nach dem aktuellen Stand der Technik die Herstellung von 3-D-Multimaterialbauteilen, die eine beliebige Materialverteilung in allen Raumachsen aufweisen. Ansätze, einen weiteren Werkstoff in den Bauprozess mit einzubringen, beispielsweise mithilfe einer Düse oder eines Fotoleiters, existieren zwar, wurden jedoch bisher noch nicht in industrielle Anlagen integriert. Mithilfe von Versuchsanlagen konnte bereits gezeigt werden, dass die Verarbeitung von verschiedenen Werkstoffen in einem Bauprozess möglich ist. So kann festgestellt werden, dass bereits verschiedene Ansätze zur Herstellung von Multimaterialbauteilen mittels additiver Fertigungstechnologien existieren. Diese sind jedoch auf Materialwechsel in Aufbaurichtung begrenzt. Ein Wechsel innerhalb einer Materialschicht wurde noch nicht näher betrachtet.

In dieser Arbeit wird hierauf aufgebaut. Es werden notwendige Anpassungen der Laserstrahlschmelz-Prozesskette erläutert, Lösungsstrategien abgeleitet und deren Auswirkungen auf die Herstellung von Multimaterialbauteilen analysiert.

Im ersten Schritt wird ein Leitfaden entwickelt, der die Auswahl eines Auftragskonzepts ermöglicht. Hierzu werden alle Auftragskonzepte in fünf verschiedene Kategorien anhand von drei Kriterien klassifiziert. In der ersten Stufe wird entschieden, ob ein flächiger oder lokaler Pulverauftrag erfolgt. Die zweite Stufe entscheidet, ob ein Absaugvorgang notwendig ist oder nicht. Schließlich wird noch unterschieden, ob ein Mono- oder Multisystem zum Einsatz kommt. Diese können bei flächigen Systemen ohne Absaugung auftreten. Mithilfe dieser Klassifizierung können Auftragskonzepte anhand von Kriterien der zu erwartenden Bauteilqualität, technologischen Anforderungen an das Auftragskonzept sowie wirtschaftlicher Aspekte ausgewählt werden. Abhängig von Bauteil und Bauprozessgestaltung können sich hier Unterschiede ergeben, die eine Auswahl ermöglichen.

Für die notwendige Datenvorbereitung im Pre-Prozess existieren bereits heute Datenformate wie das 3MF oder das AMF-Format, die mehrere Informationen speichern können und somit eine Einteilung unterschiedlicher Bauteilbereiche ermöglicht. Dies ist notwendig, da verschiedene Werkstoffe andere Prozessparameter benötigen, um verfestigt zu werden. In der Anlagentechnik muss das entsprechende

Auftragsmodul mit den notwendigen Pulverüberläufen in eine LBM-Anlage integriert werden. Auch im Prozessablauf sind Anpassungen notwendig. Bei der Integration eines flächigen Auftragskonzepts mit Absaugeinheit erfolgt der Pulverauftrag sequenziell. Nach der Verfestigung des ersten Materials erfolgt ein Absaugvorgang, bevor der zweite Werkstoff aufgebracht und verfestigt werden kann. Infolge der Materialverdichtung ist ein abschließender Absaugvorgang notwendig, um Pulvermaterial, das sich auf zuvor verfestigten Bereichen abgelegt wurde, zu entfernen. Dies verhindert die Entstehung von Querkontaminationen, die die Bauteileigenschaften negativ beeinflussen. Um das Material wieder verwenden zu können, muss es frei von Fremdpartikeln sein, welche beispielsweise durch Spritzer entstehen können. Hierzu ist es notwendig, das nicht verfestigte Pulver zu separieren.

Damit wiederholt Bauteile mit hoher Qualität gefertigt werden können, müssen sowohl die Einflussgrößen bekannt als auch Steuergrößen identifiziert sein. Da eine Verbindung auf metallurgischer Ebene erfolgt, spielt das Stoffsystem eine wichtige Rolle. Entstehen hierbei spröde Phasen, wird die Herstellung von Multimaterialbauteilen erschwert, da diese Werkstoffe schneller zur Rissbildung infolge von Eigenspannungen neigen. Weiterhin beeinflussen Unterschiede in den thermischen und thermo-mechanischen Eigenschaften die Möglichkeit, ein Bauteil im Multimaterialprozess herzustellen. Diese können bereits bei der Herstellung von 2-D-Multimaterialbauteilen dazu führen, dass Risse infolge eines erhöhten Temperaturgradienten entstehen. Diese Faktoren können jedoch durch die richtigen Steuergrößen kontrolliert werden. Hierbei sind die Größe des Übergangsbereichs sowie die Belichtungsreihenfolge zu berücksichtigen. Die Größe des Übergangsbereichs kann den Schwund der werkstoffspezifischen Bereiche, bedingt durch die sequenzielle Belichtung und die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten kompensieren, während mit der Belichtungsreihenfolge die Auswirkungen einer hohen thermischen Leitfähigkeit kontrolliert werden können.

Mit diesen Erkenntnissen ist es nun möglich, ein Vorgehen abzuleiten, mit dem die Kombinierbarkeit zweier Werkstoffe im LBM-Multimaterialprozess möglich ist. Hierzu erfolgt zunächst eine Literaturrecherche, um mögliche Herausforderungen zu identifizieren. Im Anschluss werden die Monomaterial-Prozessparameter identifiziert, bevor 2-D-Multimaterialprobekörper gefertigt werden. Sollte in keinem oder nur einem Materialübergang Risse entstehen, kann ein 3-D-Multimaterialbauteil hergestellt werden. Entstehen in beiden Materialübergängen Risse, kann kein 3-D-Multimaterialbauteil mit diskretem Materialübergang hergestellt werden.

Eine abschließende Betrachtung der Prozesskette unter wirtschaftlichen Aspekten zeigte die Kostentreiber im aktuellen Prozess auf. Hierzu wurde der In-Prozess sowie die Pulvernachbearbeitung des bestehenden Kostenmodells von KAMPS ET AL. (2018) erweitert. Die Analyse zeigt, dass insbesondere die Verluste bei der Wiederaufbereitung des Pulverwerkstoffs die Kosten für die Multimaterialverarbeitung erhöht. Weiterhin beeinflussen die langen Fertigungsdauern die Kosten negativ. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von Multilaser-Anlagen oder einem höheren Automatisierungsgrad reduziert werden.

9.2 Resümee

Ziel dieser Arbeit war es, notwendige Anpassungen der Laserstrahlschmelz-Prozesskette im Pre-, In- und Post-Prozess sowohl in Bezug auf die Anlagentechnik als auch auf den Fertigungsprozess aufzuzeigen. Auf diese Weise sollte der Leser befähigt werden, Multimaterialbauteile im LBM-Prozess herstellen zu können.

Hierzu wurde ein modularer Ansatz verfolgt. Das heißt, dass an mehreren Stellen der Monomaterialprozesskette Anpassungen vorgenommen wurden, um die Multimaterialverarbeitung zu ermöglichen. Dies trifft sowohl auf Anpassungen der Anlagentechnik zu, da innovative Auftragskonzepte, wie beispielsweise das vorgestellte Fotoleiter -Konzept, aktuell zu noch nicht gelösten Herausforderungen führen und somit nicht umgesetzt worden sind. Auch kann dies an Hand der Datenvorbereitung festgestellt werden. Nur unter Nutzung mehrerer STL-Daten ist es möglich, ein Multimaterialbauteil herzustellen, da eine Zuweisung unterschiedlicher Prozessparameter in einem Datensatz nicht erfolgen kann.

Infolge der Vielzahl an Veränderungen entlang der gesamten Prozesskette erhöht sich das Fehlerpotenzial des Systems. Fehler können beispielsweise ein nicht ausreichend guter Saugprozess nach dem Verfestigen der jeweiligen Pulverschicht sein oder ein falsches Positionieren einzelner Bauteilkomponenten im Zuge der Prozessdatenvorbereitung.

Jedoch war es mit dem modularen Ansatz möglich, erste Erkenntnisse hinsichtlich Wechselwirkungen unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften und sich daraus ergebenden Folgen für den Multimaterial-LBM-Prozess zu identifizieren. Diese Untersuchungen wurden bislang nur an der Materialverbindung Werkzeugstahl 1.2709 und der Kupferlegierung CW106C durchgeführt und sollte für weitere Materialkombinationen überprüft werden.

Im Gegensatz zu dem hier genutzten modularen Ansatz steht ein ganzheitlicher Ansatz, der alle notwendigen Anpassungen, in einem neuen Multimaterial-LBM-Gesamtkonzept integriert. Eine Grundvoraussetzung zur Umsetzung dieses Konzepts, ist die Entwicklung einer Multimaterial-LBM-Anlage, die neben einem Auftragskonzept auch entsprechende Datenschnittstellen vorsieht, sodass beispielsweise unterschiedliche Prozessparameter in unterschiedlichen Bereichen eines Bauteils leichter zugewiesen werden können. Hierdurch kann ein Fehlerpotenzial, beispielsweise als Folge eines falsch positionierten Übergangsbereiches, reduziert werden.

9.3 Ausblick

Die erfolgten Untersuchungen stellen die Grundlage für viele weiterführende Tätigkeiten im Bereich der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzens dar. Da dies bisher die ersten Untersuchungen hinsichtlich der Einflussgrößen sowie des Auftragskonzepts darstellen, sind noch vielseitige Untersuchungen notwendig, um den Multimaterialprozess besser zu verstehen, die Bauteilqualität zu optimieren oder die Baueigenschaften zu analysieren. Nachfolgend sind einige offene Punkte genannt.

Für weitere Untersuchungen sollte der prototypische Stand dieser Technologie, wie er in dieser Arbeit zum Einsatz kam, weiterentwickelt werden. Um eine Industrialisierung anzustreben, sind neben der Weiterentwicklung der Laserstrahlschmelzanlage selbst auch weitere Tätigkeiten entlang der gesamten Prozesskette notwendig. Als Beispiel sei hier eine Trenneinheit zur automatisierten Separierung der Pulverwerkstoffe genannt. Auch eine Verarbeitbarkeit von neuen Datenformaten, wie dem 3MF oder AMF-Format, würde eine Industrialisierung der Technologie unterstützen, da diese Formate nicht nur Oberflächeninformationen, sondern auch beispielsweise Materialdaten speichern können.

Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich neben der prozessseitigen Weiterentwicklung auch mit der Entwicklung von Prozessüberwachungssystemen. Diese schließen Technologien zur Überwachung des Pulverauftrags und des Schmelzbades ein. Derartige Systeme gilt es, für die Multimaterialverarbeitung zu adaptieren bzw., im Hinblick auf unterschiedliche Werkstoffeigenschaften, zu optimieren.

Die Entwicklung eines flächigen Auftragskonzepts ohne Absaugung stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Hierdurch können nicht nur Querkontaminationen vermieden, sondern auch die Auftragsdauern verkürzt werden. Hier kann zum Beispiel der Ansatz des Fotoleiter-Konzepts genutzt werden.

Zeitgleich zu diesen anlagentechnischen Anpassungen können weitere Untersuchungen hinsichtlich mechanischer Kennwerte, wie Verbindungsfestigkeiten, dem Langzeitverhalten oder der chemischen Beständigkeit, insbesondere vor dem Hintergrund der Kontaktkorrosion, durchgeführt werden. Diese können im Anschluss in Richtlinien und Standards überführt und somit einer großen Masse zugänglich gemacht werden.

Weitere Untersuchungen sollten auch möglichst viele verschiedene Materialkombinationen berücksichtigen, sodass generelle Aussagen über die Verbindungsfähigkeit von unterschiedlichen Werkstoffen getroffen werden können. Als Vorbild kann hierbei das Kohlenstoffäquivalent dienen, womit beim Fügen von Werkstoffen Aussagen über die Schweißbeignung getroffen werden können.

Um neuartige und innovative Konstruktionen zu ermöglichen, welche das Potenzial hinsichtlich Funktionsintegration und Leichtbau vollständig ausnutzen, sollten Richtlinien erarbeitet werden. Neben konstruktiven Elementen kann eine Methodik entwickelt werden, die die Möglichkeiten und Restriktionen der Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen berücksichtigt. Zusätzlich zur Herstellung von Multimaterialbauteilen, sollten auch die neugewonnenen Potenziale im Monomaterialprozess berücksichtigt werden. Diese ergeben sich beispielsweise durch die Möglichkeit, auflösbare Stützstrukturen zu fertigen, wie es LEFKY ET AL. (2017) für Bauteile aus 17-4 PH mittels Direct Energy Deposition gezeigt haben. Dies wird die Fertigungsrestriktionen, die sich im Laserstrahlschmelzprozess ergeben, weiter reduzieren und so beispielsweise das Potenzial für Funktionsintegrationen weiter vergrößern.

Zahlreiche Veröffentlichungen haben sich in den letzten Jahren mit den Möglichkeiten und Grenzen bestehender Verfahren zur Herstellung gradierter Werkstoffübergänge beschäftigt. Beispielhaft seien hier UDUPA ET AL. (2014), KIEBACK ET AL. (2003) und EL-WAZERY & EL-DESOUKY (2015) genannt. Gemeinsam ist all diesen Veröffentlichungen, dass gradierten Werkstoffübergängen großes Potenzial zugesprochen wird, da neue Werkstoffeigenschaften eingestellt werden können, die bis jetzt durch konventionelle Fügeverfahren und Werkstoffe nicht erreicht werden können. Durch das lokal selektive Verfestigen von Werkstoffen und angepasste Belichtungsstrategien, wie sie beispielhaft in dieser Arbeit betrachtet wurden, ist es möglich, diese Übergänge zu fertigen und somit das in den Veröffentlichungen aufgezeigte Potenzial zu nutzen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Verbindung der Aluminiumlegierung EN AC-43400 und der Kupferlegierung CW106C nicht erfolgreich hergestellt werden. Die Literatur zeigt jedoch vielversprechende Ergebnisse in der Gießereitechnologie

durch eine Abtrennung der beiden Werkstoffe mithilfe einer Nickelschicht (HU ET AL. 2016). Dieser Ansatz sollte für die Multimaterialverarbeitung aufgenommen und weiter untersucht werden.

10 Literaturverzeichnis

3MF CONSORTIUM 2017

3MF Consortium: 3D Manufacturing Format. Core Specification & Reference Guide (2017).

VDI 3405

Verein Deutscher Ingenieure 3405: Additive Fertigungsverfahren.

ALKAHARI ET AL. 2012

Alkahari, M. R.; Furumoto, T.; Ueda, T.; Hosokawa, A.; Tanaka, R.; Abdul Aziz, M. S.: Thermal Conductivity of Metal Powder and Consolidated Material Fabricated via Selective Laser Melting. *Key Engineering Materials* 523-524 (2012), S. 244-249.

ANDRIANI ET AL. 2014

Andriani, C.; Chua, K. C.; Liu, H. Z.: Review on Melting of Multiple Metal Materials in Additive Manufacturing. In: Kai, C. C. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing, 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing*. 26.05.2014 - 28.05.2014. Singapore: Research Publishing Services 2014, S. 170-175. ISBN: 978-981-09-0445-6.

ANSTAETT ET AL. 2016

Anstaett, C.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Mutli-Material Processing Laser Beam Melting. *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference*.

ANSTAETT ET AL. 2017

Anstaett, C.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Fabrication of 3D Multi-material Parts Using Laser-based Powder Bed Fusion. *SFF-Symposium 28th* (2017).

ANWAR & PHAM 2018

Anwar, A. B.; Pham, Q.-C.: Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting. *Additive Manufacturing* 22 (2018), S. 86-97.

BAKKELUND 1997

Bakkelund, J.: *Fabricating Layers of Loose Powder for Layer Manufacturing Technology*. Trondheim, Norwegen 1997.

BEAL 2005

Beal, V. E.: *Fabrications of Functional Gradients between Tool Steel and Copper Parts by Selective Laser Fusion Using a High Power Nd:YAF Pulsed Laser Beam to Injection Moulds Applications*. 2005.

BEAL ET AL. 2006

Beal, V. E.; Erasenthiran, P.; Hopkinson, N.; Dickens, P.; Ahrens, C. H.: The effect of scanning strategy on laser fusion of functionally graded H13/Cu materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 (2006) 9-10, S. 844-852.

BEAN ET AL. 2018

Bean, G. E.; Witkin, D. B.; McLouth, T. D.; Patel, D. N.; Zaldivar, R. J.: Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting. *Additive Manufacturing* 22 (2018), S. 207-215.

BECKER 2014

Becker, D.: *Selektives Laserschmelzen von Kupfer und Kupferlegierungen.* (Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2014). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl. 2014. ISBN: 978-3-86359-217-2. (Ergebnisse aus der Lasertechnik).

BERGMANN 2009

Bergmann, W.: *Werkstofftechnik 2* (2009).

BETZ 09.11.1994

Schutzrecht. Deutschland DE4439984C1 (21.03.1996). Betz, Gerhard Pr.: DE1994443998409.11.1994Betz, G.: Dauerform für Metall-, Kunststoff- und Glasguß.

BETZ 03.07.2002

Schutzrecht. Deutschland DE10229994C1 (02.10.2003). Betz, Gerhard Pr.: DE200212999403.07.2002Betz, G.: Verfahren zum Herstellen und/oder Wärmebehandeln eines räumlichen Werkstoffverbundes.

BMBF Januar 2015

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): *Vom Material zur Innovation.* Januar 2015.

BRANNER 2011

Branner, G.: *Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren.* München: Herbert Utz Verlag 2011. (Forschungsberichte IWB Band 246).

BRÄUNIG ET AL. 2015

Bräunig, J.; Töppel, T.; Müller, B.; Burkhardt, M.; Hipke, T.; Drossel, W.-G.: *Advanced Material Studies for Additive Manufacturing in terms of Future Gear Application.* *Advances in Mechanical Engineering* 6 (2015) 1, S. 741083.

BUCHBINDER ET AL. 2011

Buchbinder, D.; Schleifenbaum, H.; Heidrich, S.; Meiners, W. D.; Bültmann, J.:

High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. *Physics Procedia* (2011).

CARTER ET AL. 2014

Carter, L. N.; Martin, C.; Withers, P. J.; Attallah, M. M.: The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds* 615 (2014), S. 338-347.

CASALINO ET AL. 2015

Casalino, G.; Campanelli, S. L.; Contuzzi, N.; Ludovico, A. D.: Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics & Laser Technology* 65 (2015), S. 151-158.

CHASTEL & PASSEMARD 2014

Chastel, Y.; Passemard, L.: Joining Technologies for Future Automobile Multi-material Modules. *Procedia Engineering* 81 (2014), S. 2104-2110.

CHEN ET AL. 2012

Chen, X.; Seyfang, K.; Steckel, H.: Development of a micro dosing system for fine powder using a vibrating capillary. Part 1. The investigation of factors influencing on the dosing performance. *International journal of pharmaceutics* 433 (2012) 1-2, S. 34-41.

CHEN ET AL. 2013

Chen, S.; Huang, J.; Xia, J.; Zhang, H.; Zhao, X.: Microstructural Characteristics of a Stainless Steel/Copper Dissimilar Joint Made by Laser Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A* 44 (2013) 8, S. 3690-3696.

CHENG ET AL. 2016

Cheng, B.; Shrestha, S.; Chou, K.: Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Additive Manufacturing* 12 (2016), S. 240-251.

CHIANRABUTRA ET AL. 2014

CHIANRABUTRA ET AL.: A Dry Powder Material Delivery Device for Multiple Material Additive Manufacturing. Austin, Texas, 2014.

CHIVEL 2016

Chivel, Y.: New Approach to Multi-material Processing in Selective Laser Melting. *Physics Procedia* 83 (2016), S. 891-898.

CHOI ET AL. 2011

Choi, J.-W.; Kim, H.-C.; Wicker, R.: Multi-material stereolithography. *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 3, S. 318-328.

CHOPDE ET AL. 2017

Chopde, R. S.; Gadewar, S. P.; Khond, M. P.; Rathod, M. J.: Study on Laser beam Welding of Copper and Aluminum joint. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering 17 (2017) 10, S. 65-74.

CYR ET AL. 2018

Cyr, E.; Asgari, H.; Shamsdini, S.; Purdy, M.; Hosseinkhani, K.; Mohammadi, M.: Fracture behaviour of additively manufactured MS1-H13 hybrid hard steels. Materials Letters 212 (2018), S. 174-177.

DAS 2004

Das, K. A.: An Investigation on the Printing of Metal and Polyer Powders Using Electrophotographic Solid Freeform Fabrication. 2004.

DEMIR & PREVITALI 2017

Demir, A. G.; Previtali, B.: Multi-material selective laser melting of Fe/Al-12Si components. Manufacturing Letters 11 (2017), S. 8-11.

DEUTSCHES KUPFERINSTITUT 2005

Deutsches Kupferinstitut: Werkstoffdatenbaltt CuCrZr (2005).

DI WANG ET AL. 2017

Di Wang; Wu, S.; Fu, F.; Mai, S.; Yang, Y.; Liu, Y.; Song, C.: Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. Materials & Design 117 (2017), S. 121-130.

DÖRRENBURG EDELSTAHL 2019

Dörrenberg Edelstahl: Werkstoffdatenblatt 1.2709. <http://www.dorrenberg.es/download/aceros/DOE/1.2709_deu.pdf> - 01.11.2019.

EISEN 2010

Eisen, M. A.: Optimierte Parameterfindung und prozessorientiertes Qualitätsmanagement für das Selective-Laser-Melting-Verfahren. (Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2009). Aachen: Shaker-Verl. 2010. ISBN: 978-3-8322-8827-3. (Berichte aus der Fertigungstechnik).

EL-WAZERY & EL-DESOUKY 2015

EL-Wazery, M. S.; EL-Desouky, A. R.: A review on Functionally Graded Ceramic-Metal Materials. Journal of Materials and Environmental Science (2015) 6, S. 1369-1376.

DIN 8593

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 6: Fügen durch Schweißen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe: Beuth.

FU ET AL. 2016

FU ET AL.: Selective laser melting of copper based alloy on Steel: A Preliminary Study, 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016). singapore, 16.05-19.05. 2016. (2016).

FUJII ET AL. 2018

Fujii, H. T.; Endo, H.; Sato, Y. S.; Kokawa, H.: Interfacial microstructure evolution and weld formation during ultrasonic welding of Al alloy to Cu. *Materials Characterization* 139 (2018), S. 233-240.

GEBHARDT 2017

Gebhardt, A.: *Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage.* München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2017.
ISBN: 3446452362.

GELDART 1973

Geldart, D.: Types of gas fluidization. *Powder Technology* 7 (1973) 5, S. 285-292.

GERSTGASSER ET AL. 2019

Gerstgasser, M.; Maier, M.; Borinelli, J.; Wegener, K.: New concepts for multi-material processing with SLM. *Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference 2019* 2019 (2019).

GIBSON ET AL. 2010

Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies.* Boston, MA: Springer US 2010.

GLARDON ET AL. 2001

Glardon, R.; Karapatis, N.; Romano, V.; Levy, G. N.: Influence of Nd:YAG Parameters on the Selective Laser Sintering of Metallic Powders. *CIRP Annals* 50 (2001) 1, S. 133-136.

GLASSCHROEDER ET AL. 2015

Glasschroeder, J.; Prager, E.; Zaeh, M.: Powder-Bed Based 3D-Printig of Function Integrated Parts. *Rapid Prototyping Journal* (2015) 21.

GOMERINGER ET AL. 2017

Gomeringer, R.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Menges, V.; Oesterle, S.; Rapp, T.; Scholer, C.; Stenzel, A.; Stephan, Andreas; Wieneke, Falko: *Tabellenbuch Metall. [mit Formelsammmlung]. 47., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, korrigier-*

ter Nachdruck 2017. Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG 2017. ISBN: 978-3-8085-1727-7. (Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe).

GONG ET AL. 2014

Gong, H.; Rafi, K.; Gu, H.; Starr, T.; Stucker, B.: Analysis of defect generation in Ti–6Al–4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing* 1-4 (2014), S. 87-98.

GROCHE ET AL. 2014

Groche, P.; Wohletz, S.; Brenneis, M.; Pabst, C.; Resch, F.: Joining by forming—A review on joint mechanisms, applications and future trends. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 10, S. 1972-1994.

GU & SHEN 2007

Gu, D.; Shen, Y.: Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder. *Journal of Alloys and Compounds* 432 (2007) 1-2, S. 163-166.

GUSAROV & SMUROV 2010

Gusarov, A. V.; Smurov, I.: Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting. *Physics Procedia* 5 (2010), S. 381-394.

GUZMÁN & HERNÁNDEZ ARROYO 2016

Guzmán, R. E.; Hernández Arroyo, E.: Influence of thermal residual stress on behaviour of metal matrix composites reinforced with particles. *Journal of Physics: Conference Series* 687 (2016), S. 12060.

HASCOT ET AL. 2011

Hascot, J. Y.; Muller, P.; Mognol, P.: Manufacturing of complex parts with continuous functionally graded materials (FGM). *SFF-Symposium* (2011).

HEß 2015

Heß, T.: Beitrag zur Qualifizierung des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens zur Serienfertigung am Beispiel der Triebwerksindustrie. (Dissertation) (2015) - 10.09.2017.

HILLER & LIPSON 2009

Hiller, J.; Lipson, H.: Fully Recyclable Multi-Material Printing. *Proceedings of the Twentieth Annual International Solid Freeform Fabrication SFF 20th* (2009).

HOPKINSON & DICKNES 2003

Hopkinson, N.; Dicknes, P.: Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production. *Proceedings of the Institution of Mechanical*

Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 217 (2003) 1, S. 31-39.

HU ET AL. 2016

HU, Y.; CHEN, Y.; LI, L.; HU, H.; ZHU, Z.: Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 26 (2016) 6, S. 1555-1563.

JERRARD ET AL. 2009

Jerrard, P. G.; Hao, L.; Evans, K. E.: Experimental investigation into selective laser melting of austenitic and martensitic stainless steel powder mixtures. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 223 (2009) 11, S. 1409-1416.

JIANG ET AL. 2018

Jiang, W.; Li, G.; Wu, Y.; Liu, X.; Fan, Z.: Effect of heat treatment on bonding strength of aluminum/steel bimetal produced by a compound casting. Journal of Materials Processing Technology 258 (2018), S. 239-250.

KAMPS ET AL. 2018

Kamps, T.; Lutter-Guenther, M.; Seidel, C.; Gutowski, T.; Reinhart, G.: Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (2018).

KARAPATIS ET AL. 1999

Karapatis, N.; Egger, G.; Gygax, P.-E.; Glardon, R.: Optimization of Powder Layer Density in Selective Laser Sintering. 10 th Solid Freeform Fabrication Proceedings (1999).

KARLSEN 1998

Karlsen, R.: Consolidation of thin powder layers for layer manufacturing technology. Trondheim, Norwegen: NTNU 98001 1998. ISBN: 82-471-0195-5.

KARLSEN & BAKKELUND 2004

Schutzrecht WO/2004/037469 (06.05) Karlsen, R.; Bakkelund, J.: Method and Apparatur for Rapid Manufacturing of Metal and Ceramic and Metal-Ceramic Products.

KEMPEN ET AL. 2011a

Kempen, K.; Yasa, E.; Thijs, L.; Kruth, J.-P.; van Humbeeck, J.: Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel. Physics Procedia 12 (2011), S. 255-263.

KEMPEN ET AL. 2011b

Kempen, K.; Thijs, L.; Yasa, E.; Badrossamay, M.; Verheecke, W.; Kruth, J.-P.:

Process Optimization and Microstructural Analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg. Solid Freeform Fabrication Proceedings (2011).

KHAIRALLAH ET AL. 2016

Khairallah, S. A.; Anderson, A. T.; Rubenchik, A.; King, W. E.: Laser powder-bed fusion additive manufacturing. Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia* 108 (2016), S. 36-45.

KIEBACK ET AL. 2003

Kieback, B.; Neubrand, A.; Riedel, H.: Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering: A* 362 (2003) 1-2, S. 81-106.

KNIFFKA ET AL. 2016

Kniffka, W.; Eichmann, M.; Witt, G.: Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 14–16 June 2016. München: Hanser 2016. ISBN: 978-3-446-45060-8.

KOOPMANN ET AL. 2019

Koopmann, J.; Voigt, J.; Niendorf, T.: Additive Manufacturing of a Steel–Ceramic Multi-Material by Selective Laser Melting. *Metallurgical and Materials Transactions B* 50 (2019) 2, S. 1042-1051.

KOPP ET AL. 2019

Kopp, S.-P.; Stichel, T.; Schuffenhauer, T.; Roth, S.; Schmidt, M.: Herausforderungen der additiven Fertigung von Multi-Material-Bauteilen. In: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer (Hrsg.): *Additive Fertigung: Vom Pulver zum multifunktionalen Bauteil* 2019, S. 35-51. ISBN: 978-3-931864-81-1.

KOPP ET AL. 2020

Kopp, S.-P.; Stichel, T.; Roth, S.; Schmidt, M.: Investigation of the electrophotographic powder deposition through a transfer grid for efficient additive manufacturing. *Procedia CIRP* 94 (2020), S. 122-127.

KRANERT & CORD-LANDWEHR 2010

Kranert, Martin; Cord-Landwehr, Klaus (Hrsg.): *Einführung in die Abfallwirtschaft. Mit 131 Tabellen.* 4., vollst. aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010.

KRAUSS 2016

Krauss, H.: *Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise*

thermografische In-Process-Überwachung. (Dissertation)Herbert Utz Verlag GmbH (2016).

KRUTH ET AL. 2012

Kruth, J.-P.; Deckers, J.; Yasa, E.; Wauthlé, R.: Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 226 (2012) 6, S. 980-991.

KUESTERS ET AL. 2011

Kuesters, Y.; Schaefer, M.; Witt, G.: Robuster Strahlschmelzprozess durch methodische Parameterfindung. RTejournal (2011).

KÜGLER & VOLLERTSEN 2013

Kügler, H.; Vollertsen, F.: Inductive Preheating in Laser Beam Welding of Multimaterial Joints of 22MnB5 and AA6016. Physics Procedia 41 (2013), S. 41-48.

KUMAR ET AL. 2003

Kumar, P.; Beck, E.; Das, S.: Preliminary Investigations on the Deposition of fine Powders through Miniature Hopper-Nozzles Applied to Multi-Material Solid Freeform Fabrication. SFF-Symposium - 30.11.2016.

KUMAR ET AL. 2004

Kumar, A. V.; Dutta, A.; Fay, J. E.: Electrophotographic printing of part and binder powders. Rapid Prototyping Journal 10 (2004) 1, S. 7-13.

LANGFELD ET AL. 2016

Langefeld; Bernhard; Veenker; Hendrik; Schaeff; Christoph; Balzer: Additive Manufacturing - next generation (AMnx) Study 2016 (2016).

LAPPO ET AL. 2003

Lappo, K.; Jackson, B.; Wood, K. L.; Bourell, D. L.; Beaman, J. J.: Discrete Multiple Material Selective Laser Sintering (M2SLS): Experimental Study of Part Processing. Solid Freeform Fabrication Proceedings (2003).

LEE, KWANG, SEOK & KWON 2013

Lee, Kwang, Seok; Kwon, Y.-N.: Solid-state bonding between Al and Cu by vacuum hot pressing. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 23 (2013) 2, S. 341-346.

LEFKY ET AL. 2017

Lefky, C. S.; Zucker, B.; Wright David; Nassar, A. R.; Simpson, T. W.; Hildreth, O. J.: Dissolvable Support in Powder Bed Fusion-Printed Stainless Steel. 3D Printing and Additive Manufacturing (2017) 4.

LIEW ET AL. 2001

Liew, C. L.; Leong, K. F.; Chua, C. K.; Du, Z.: Dual Material Rapid Prototyping Techniques for the Development of Biomedical Devices. Part1: Space Creation. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2001) 18, S. 717-723.

LINDEMANN ET AL. 2012

LINDEMANN ET AL.: Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing, SFF An Additive Manufacturing Conference. Austin Texas, 2012.

LIU ET AL. 2014

Liu, Z. H.; Zhang, D. Q.; Sing, S. L.; Chua, C. K.; Loh, L. E.: Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing. Metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy. Materials Characterization 94 (2014), S. 116-125.

LIU ET AL. 2015

Liu, Y.; Yang, Y.; Mai, S.; Di Wang; Song, C.: Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder. Materials & Design 87 (2015), S. 797-806.

MAI & SPOWAGE 2004

Mai, T. A.; Spowage, A. C.: Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel? Kovar, copper?steel and copper?aluminium. Materials Science and Engineering: A 374 (2004) 1-2, S. 224-233.

MARTENS & GOLDMANN 2016

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (Hrsg.): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016. ISBN: 978-3-658-02785-8.

MARTINSEN ET AL. 2015

Martinsen, K.; Hu, S. J.; Carlson, B. E.: Joining of dissimilar materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology 64 (2015) 2, S. 679-699.

MASOOMI ET AL. 2017

Masoomi, M.; Thompson, S. M.; Shamsaei, N.; Haghshenas, M.: Effects of Scanning Strategy on Residual Stress Formation in Additively Manufactured Ti-6Al-4V Parts. Solid Freeform Fabrication Proceedings (2017).

MASOOMI ET AL. 2018

Masoomi, M.; Pegues, J. W.; Thompson, S. M.; Shamsaei, N.: A numerical and

experimental investigation of convective heat transfer during laser-powder bed fusion. Additive Manufacturing (2018).

MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. (Dissertation) (1999).

MEINERS & WISSENBACH 2009

Schutzrecht DE102007029052 A1 Meiners, W. D.; Wissenbach, K. D.: Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines Bauteils basierend auf dreidimensionalen Daten des Bauteils.

MENEGHETTI ET AL. 2017

Meneghetti, G.; Rigon, D.; Cozzi, D.; Waldhauser, W.; Dabalà, M.: Influence of build orientation on static and axial fatigue properties of maraging steel specimens produced by additive manufacturing. Procedia Structural Integrity 7 (2017), S. 149-157.

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.

MERKT 2015

Merkt, S. J.: Qualifizierung von generativ gefertigten Gitterstrukturen für maßgeschneiderte Bauteilfunktionen. 2015.

DIN EN ISO 6507-1

DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren.

VDI-Richtlinie 2221

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte: Mai 1993.

MULLER ET AL. 2013

Muller, P.; Mognol, P.; Hascoet, J.-Y.: Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing. Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 5, S. 685-692.

MUMTAZ & HOPKINSON 2007

Mumtaz, K. A.; Hopkinson, N.: Laser melting functionally graded composition of Waspaloy® and Zirconia powders. Journal of Materials Science 42 (2007) 18, S. 7647-7656.

MUNSCH 2013

Munsch, M.: Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug in der laseradditiven Fertigung. Göttingen: Cuvillier Verlag 2013. ISBN: 9783736945012. (Schriftenreihe Lasertechnik v.6).

MUTUA ET AL. 2018

Mutua, J.; Nakata, S.; Onda, T.; Chen, Z.-C.: Optimization of selective laser melting parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel. *Materials & Design* 139 (2018), S. 486-497.

NADIMPALLI ET AL. 2019

Nadimpalli, V. K.; Dahmen, T.; Valente, E. H.; Mohanty, S.; Pedersen, D. B.: Multi-material additive manufacturing of steels using laser powder bed fusion. *Proceedings of the 19th International Conference and Exhibition (EUSPEN 2019)* (2019), S. 240-243.

NATIONAL PHYSIK LABRATORY 2010

National Physik Labratory: Phasendiagramm Cu - Al. <<http://resource.npl.co.uk/mtdata/phdiagrams/png/alcu.png>>.

NATIONAL PHYSIK LABRATORY 2012

National Physik Labratory: Calculated Cu-Fe phase diagram. <<http://resource.npl.co.uk/mtdata/phdiagrams/cufe.htm>>.

NGUYEN ET AL. 2019

Nguyen, D.-S.; Park, H.-S.; Lee, C.-M.: Applying Selective Laser Melting to Join Al and Fe: An Investigation of Dissimilar Materials. *Applied Sciences* 9 (2019) 15, S. 3031.

ONUIKE ET AL. 2018

Onuike, B.; Heer, B.; Bandyopadhyay, A.: Additive manufacturing of Inconel 718—Copper alloy bimetallic structure using laser engineered net shaping (LENS™). *Additive Manufacturing* 21 (2018), S. 133-140.

OTT 2012

Ott, M.: Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung. München: Herbert Utz Verlag 2012.

OVER 2003

Over, C.: Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit "Selective Laser Melting". (Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2003). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3832222456. (Berichte aus der Lasertechnik).

PEGNA ET AL. 1999

PEGNA ET AL.: THE SAND-PAINTER: Two-dimensional powder deposition. Austin, Texas, 1999.

PERRET ET AL. 2008

Schutzrecht DE 102006055052A1 Perret, H.; Halder, T.; Keller, P.; Mattes, T.: Vorrichtung zum schichtweisen Herstellen eines dreidimensionalen Objekts.

POGSON ET AL. 2003

Pogson, S. R.; Fox, P.; Sutcliffe, C. J.; O'Neill, W.: The production of copper parts using DMLR. Rapid Prototyping Journal 9 (2003) 5, S. 334-343.

PONWEISER ET AL. 2011

Ponweiser, N.; Lengauer, C. L.; Richter, K. W.: Re-investigation of phase equilibria in the system Al-Cu and structural analysis of the high-temperature phase η_1 -Al₁₁- δ Cu. Intermetallics 19 (2011) 11, S. 1737-1746.

PRÜß ET AL. 2010

Prüß, H.; Stechert, C.; Vietor, T.: Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen. 21. DfX-Symposium.

QIU ET AL. 2013

Qiu, C.; Adkins, N. J.; Attallah, M. M.: Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V. Materials Science and Engineering: A 578 (2013), S. 230-239.

VDI-Richtlinie 3822 Blatt 1.6

VDI 3822 Blatt 1.6, 86: Qualitätssicherung und Schadensprävention bei Metallbauteilen: 2017.

REHME 2009

Rehme, O.: Cellular design for laser freeform fabrication. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier 2009. ISBN: 9783869552736. (Schriftenreihe Lasertechnik Bd. 4).

RISS 2016

Riss, F. K.: Funktions- und belastungsgerechte Auslegung additiv gefertigter Wabenkerne für Sandwichbauteile. München: Herbert Utz Verlag 2016. (Forschungsberichte IWB).

ROWOLT ET AL. 2017

Rowolt, C.; Mikereit, B.; Kamps, T.; Seidel, C.; Gebauer, M.; Müller, B.; Keßler, O.: Einfluss der Wärmebehandlung auf die Werkstoffeigenschaften laserstrahl-gemelter Bauteile aus AlSi10Mg und X5CrNiCuNb16-4. DVS Kongress 2017 2017 (2017).

SCHMALEN ET AL. 2018

Schmalen, P.; Plapper, P.; Peral, I.; Titov, I.; Vallcorba, O.; Rius, J.: Composition and phases in laser welded Al-Cu joints by synchrotron x-ray microdiffraction. *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 27-32.

SCHÖNEBORN & ZILIAN 2010

Schutzrecht EP2191922 A1 Schöneborn, H.; Zilian, C.: Pulverauftragsvorrichtung für eine Anlage zur Herstellung von Werkstücken durch Beaufschlagen von Pulverschichten mit elektromagnetischer Strahlung oder Teilchenstrahlung.

SCHULZE 2010

Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2010.

SCHWARZE ET AL. 2016

Schutzrecht EP 2818305 A1 Schwarze, D.; Wiesner, A.; Hermann, A.: Powder application apparatus and method of operating a powder application apparatus.

SEIDEL 2017

Seidel, C.: Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen. München: Utz 2017. (Forschungsberichte IWB).

SHABANIAN ET AL. 2012

Shabanian, J.; Jafari, R.; Chaouki, J.: Fluidization of Ultrafine Powders. *International Review of Chemical Engineering* 4 (2012) 1.

SHAKERIN ET AL. 2019

Shakerin, S.; Hadadzadeh, A.; Amirkhiz, B. S.; Shamsdini, S.; Li, J.; Mohammadi, M.: Additive manufacturing of maraging steel-H13 bimetal using laser powder bed fusion technique. *Additive Manufacturing* 29 (2019), S. 100797.

SHIOMI ET AL. 2004

Shiomi, M.; Osakada, K.; Nakamura, K.; Yamashita, T.; Abe, F.: Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process. *CIRP Annals* 53 (2004) 1, S. 195-198.

SING ET AL. 2015

Sing, S. L.; Lam, L. P.; Zhang, D. Q.; Liu, Z. H.; Chua, C. K.: Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing. Intermetallic phase formation between AlSi10Mg and C18400 copper alloy. *Materials Characterization* 107 (2015), S. 220-227.

SINHA ET AL. 2016

Sinha, V. C.; Kundu, S.; Chatterjee, S.: Microstructure and mechanical properties

of similar and dissimilar joints of aluminium alloy and pure copper by friction stir welding. *Perspectives in Science* 8 (2016), S. 543-546.

DIN EN ISO/ASTM 52915:2017-10

DIN EN ISO/ASTM 52915:2017-10: Spezifikation für ein Dateiformat für Additive Fertigung (AMF) Version 1.2: Beuth 2017-10.

SPIERINGS & LEVY 2009a

Spierings, A. B.; Levy, G.: Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades. *Solid Freeform Fabrication Proceedings* (2009).

SPIERINGS & LEVY 2009b

Spierings, A. B.; Levy, G.: Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades. *Solid Freeform Fabrication Proceedings* (2009).

STICHEL ET AL. 2014

Stichel, T.; Laumer, T.; Amend, P.; Roth, S.: Electrostatic Multi-Material Powder Deposition for Simultaneous Laser Beam Melting. *iCAT* (2014).

SUGAVANESWARAN & ARUMAIKKANNU 2014

Sugavaneswaran, M.; Arumaikkannu, G.: Modelling for randomly oriented multi material additive manufacturing component and its fabrication. *Materials & Design* (1980-2015) 54 (2014), S. 779-785.

SUN & ION 1995

Sun, Z.; Ion, J. C.: Laser welding of dissimilar metal combinations. *Journal of Materials Science* 30 (1995) 17, S. 4205-4214.

TEJASWINI ET AL. 2015

Tejaswini, N.; Ramesh Babu, K.; Sai Ram, K. S.: Functionally Graded Material: An Overview. *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology* 2015 (2015) Volume 4, Number 3, S. 183-188.

THIJS ET AL. 2010

Thijs, L.; Verhaeghe, F.; Craeghs, T.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia* 58 (2010) 9, S. 3303-3312.

THIJS ET AL. 2013

Thijs, L.; Kempen, K.; Kruth, J.-P.; van Humbeeck, J.: Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia* 61 (2013) 5, S. 1809-1819.

THOMAS & GILBERT 2014

Thomas, D. S.; Gilbert, S. W.: Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing: National Institute of Standards and Technology 2014.

UDUPA ET AL. 2014

Udupa, G.; Rao, S. S.; Gangadharan, K. V.: Functionally Graded Composite Materials: An Overview. *Procedia Materials Science* (2014) 5, S. 1291-1299.

UHLMANN ET AL. 2016

Uhlmann, E.; Tekkaya, A.E. Kashevko, V.; Gles, S.; Reimann, R.; John, P.: Qualification of CuCr1Zr for the SLM Process. 7th International Conference on High Speed Forming (2016).

VAEZI ET AL. 2013

Vaezi, M.; Chianrabutra, S.; Mellor, B.; Yang, S.: Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review. *Virtual and Physical Prototyping* 8 (2013) 1, S. 19-50.

VAN DER EIJK ET AL. 2004

van der Eijk, C.; Mugaas, T., Asebo, O.; Kolnes, O.; Skjevvald, R.: Metal Printing Process-Development of a New Rapid Manufacturing Process for Metal Parts. *Proceedings of the World PM* (2004).

VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995

van der Schueren, B.; Kruth, J. P.: Powder deposition in selective metal powder sintering. *Rapid Prototyping Journal* 1 (1995) 3, S. 23-31.

VAN ELSSEN 2007

van Elsen, M.: Complexity of Selective Laser Melting. a new optimisation approach. Katholieke Universiteit Leuven. 2007.

VDI 3405 2015

VDI 3405: VDI-Richtlinie 3405 Blatt 3 Additive Fertigungsverfahren. Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen. VDI: Beuth 2015.

VDI Richtlinie 3405

VDI 3405: VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2: Beuth 2013.

VDI Richtlinie 3405 Blatt 2

VDI 3405 Blatt 2: VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2.1: Beuth 2015.

VRANCKEN ET AL. 2013

Vrancken, B.; Wauthlé, R.; Kruth, J. P.; van Humbeeck, J.: Study of the Influence of Material Properties on Residual Stress in Selektive Laser Melting. Solid Freeform Fabrication Proceedings 2013 (2013).

WEI ET AL. 2016

Wei, J.; Zhang, H.; Wang, Y.; Wen, Z.; Yao, B.; Dong, J.: The gas-solid flow characteristics of cyclones. Powder Technology 308 (2016), S. 178-192.

WEI ET AL. 2018

Wei, C.; Li, L.; Zhang, X.; Chueh, Y.-H.: 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting. CIRP Annals (2018).

WEINGARTEN ET AL. 2015

Weingarten, C.; Buchbinder, D.; Pirch, N.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe, R.: Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. Journal of Materials Processing Technology 221 (2015), S. 112-120.

WIRTZ 2005

Wirtz, T. P.: Herstellung von Knochenimplantaten aus Titanwerkstoffen durch Laserformen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. 2005.

WITHERS & BHADESHIA 2013

Withers, P. J.; Bhadeshia, H.: Residual stress. Part 2 – Nature and origins. Materials Science and Technology 17 (2013) 4, S. 366-375.

WITS ET AL. 2016

Wits, W. W.; Carmignato, S.; Zanini, F.; Vaneker, T. H.: Porosity testing methods for the quality assessment of selective laser melted parts. CIRP Annals 65 (2016) 1, S. 201-204.

WOHLERS 2018

WOHLERS, T. T.: WOHLERS REPORT. 3d printing and additive manufacturing state of the industry. FORT COLLINS: WOHLERS ASSOCIATES 2018. ISBN: 978-0-9913332-4-0.

WOHLERS ASSOCIATIONS 2016

Wohlers Associations: Wohlers Report 2016 (2016).

WOLFENSBERGER 2019

Wolfensberger: Materialdatenblatt Maraging Steel 1.2709. <https://www.wolfensberger.ch/fileadmin/user_upload/MaragingSteel_1.2709.pdf> - 01.11.2019.

YADROITSEV ET AL. 2015

Yadroitsev, I.; Krakhmalev, P.; Yadroitsava, I.: Hierarchical design principles of selective laser melting for high quality metallic objects. *Additive Manufacturing* 7 (2015), S. 45-56.

YANG & EVANS 2003

Yang, S.; Evans, J. R.: Computer control of powder flow for solid freeforming by acoustic modulation. *Powder Technology* 133 (2003) 1-3, S. 251-254.

YANG & EVANS 2004

Yang, S.; Evans, J. R.: Acoustic control of powder dispensing in open tubes. *Powder Technology* 139 (2004) 1, S. 55-60.

YANG & EVANS 2007

Yang, S.; Evans, J.: Metering and dispensing of powder; the quest for new solid freeforming techniques. *Powder Technology* 178 (2007) 1, S. 56-72.

YASHCHUK ET AL. 2002

Yashchuk, V. V.; Sushkov, A. O.; Budker, D.; Lee, E. R.; Lee, I. T.; Perl, M. L.: Production of dry powder clots using a piezoelectric drop generator. *Review of Scientific Instruments* 73 (2002) 6, S. 2331-2335.

YURI ALEXANDROVICH CHIVEL ET AL. 2010

Schutzrecht EP20090167817 Yuri Alexandrovich Chivel; Igor Smurov; Bernard Laget; Igor Yadroitsev: Verfahren zur Herstellung eines Werkstücks durch Schmelzen oder selektives Sintern mit Hilfe eines Lasers von Pulvern aus unterschiedlichen Materialien.

ZERBST & HILGENBERG 2017

Zerbst, U.; Hilgenberg, K.: Damage development and damage tolerance of structures manufactured by selective laser melting – a review. *Procedia Structural Integrity* 7 (2017), S. 141-148.

ZHANG ET AL. 2014

Zhang, H.; Chen, Y.; Luo, A. A.: A novel aluminum surface treatment for improved bonding in magnesium/aluminum bimetallic castings. *Scripta Materialia* 86 (2014), S. 52-55.

ZHANG ET AL. 2019

Zhang, X.; Wei, C.; Chueh, Y.-H.; Li, L.: An Integrated Dual Ultrasonic Selective Powder Dispensing Platform for Three-Dimensional Printing of Multiple Material Metal/Glass Objects in Selective Laser Melting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141 (2019) 1.

ZHANG & BERNARD 2013

ZHANG & BERNARD: Generic Build Time Estimation Model for Parts Produced by SLS, Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping. Leiria, Portugal, 2013.

11 Anhang

11.1 Genutztes Equipment

11.1.1 Die Laserstrahlschmelzanlage

Typ	SLM MTT 250 HL
Bauraum	Standard: 250 x 250x 380 mm ³ Bauraumverkleinerung: 48 x48 x ... mm ³
Lasertyp	Ytterbium-Faserlaser
Laserleistung	Maximal 400 W
Belichtungsgeschwindigkeit	Maximal 20 m/s
Max. Aufbaurate	Maximal 20 cm ³ /h
Pulverschichtdicke d	Variabel 20 µm – 100 µm
Bauraumheizung T _{HV}	Maximal 200° C

11.1.2 Lichtmikroskop

Hersteller	Olympus
Modell	BX653M

11.1.3 Mikroskop

Hersteller	Keyence
Modell	3D-Laserscan-Farbmirkoskope VK-9700 Generation II

11.1.4 Elektronenstrahlmikroskop

Hersteller Hitachi

Modell TM3030Plus Tabletop Microscop

11.1.5 EDX-Analyse

Hersteller Quantax

Modell

11.1.6 Härteprüfmaschine

Hersteller Zwick&Roell

Modell Material-Prüfmaschine Z2.5

11.2 Experimentelle Bestimmung der Ablegegeschwindigkeit mittels Düse

Die maximale Ablegegeschwindigkeit wird benötigt, um die Dauer zu bestimmen, wie lange ein Ablegevorgang benötigt. Eine kritische Größe hierfür ist der Massendurchsatz. Wie aus Abbildung 11-1 ersichtlich wird, hängt der Massendurchsatz neben der Frequenz der Schwingung auch vom Öffnungsdurchmesser der Düse ab. Es wird auch deutlich, dass zu jedem Durchmesser eine bestimmte Frequenz eingesetzt werden muss, um den optimalen Durchsatz zu erreichen (vgl. Abschnitt 2.3.4).

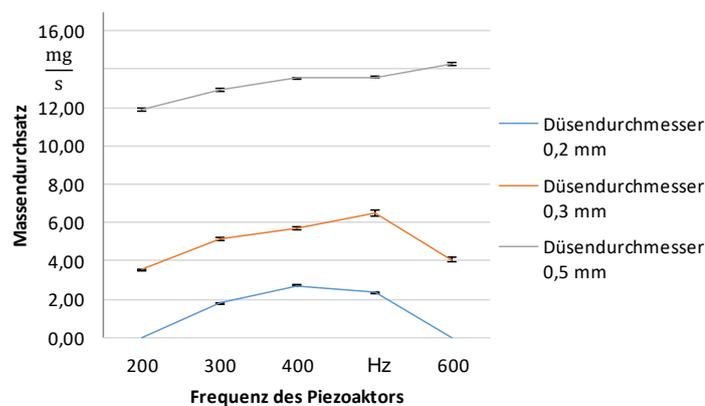


Abbildung 11-1: Einfluss des Düsendurchmessers auf den Massendurchsatz bei unterschiedlichen Frequenzen und konstanter Amplitude von $50 \mu\text{m}$

Die Ablegegeschwindigkeit der Düse sollte prinzipiell so schnell wie möglich gewählt werden. Hierbei muss auf der einen Seite immer eine geschlossene Pulverspur gewährleistet werden. Auf der anderen Seite muss die kleinste Struktur abgebildet werden können. Somit muss stets ein Kompromiss aus Abbildungsgenauigkeit und Ablegegeschwindigkeit gewählt werden. Wie aus Abbildung 11-2 ersichtlich wird, werden mit größeren Ablegegeschwindigkeiten die Pulverspuren inhomogener. Es treten vermehrt Fehlstellen zwischen einzelnen Pulverpartikeln auf. Damit keine Fehlstellen im Bauteil entstehen, sollte eine Pulverspur geschlossen sein. Dies bei einer Ablegegeschwindigkeit von $50 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ gegeben. Daher wird für die Bestimmung der Ablegedauer diese Geschwindigkeit verwendet.

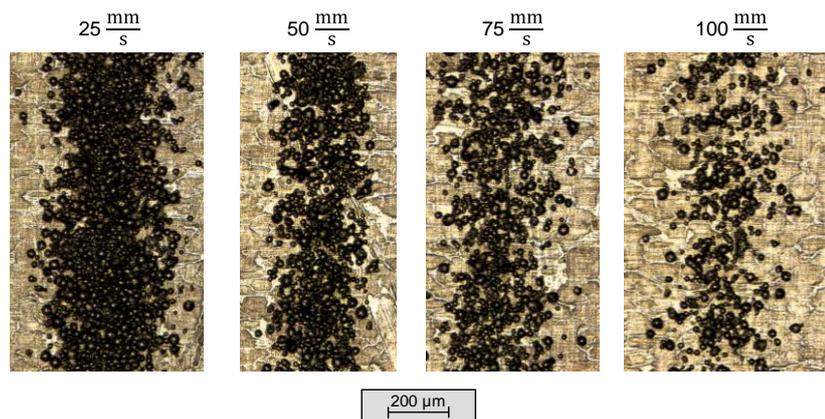


Abbildung 11-2: Aufnahmen von Pulverspuren abgelegt mit einer Düse mit Öffnungsdurchmesser 0,2 mm und einer Frequenz von 500 Hz mit unterschiedlichen Ablegegeschwindigkeiten

11.3 Plausibilisierung der magnetbasierten Pulvertrennung

Werkstoffe können abhängig von ihren Eigenschaften voneinander separiert werden. Derzeit sind alle Verfahren auf größere Partikel ausgelegt, als sie im LBM-Prozess eingesetzt werden. Die beiden Werkstoffe 1.2709 und CW106C unterscheiden sich in ihren magnetischen Eigenschaften. Somit besteht die Möglichkeit, die Materialien zu trennen. Diese Variante stellt eine vielversprechende Lösung dar, die schnell auf ein industrielles Niveau mit größeren Pulvermengen übertragen werden kann. Dies wurde mithilfe eines Magnetstabs der Stärke 3000 Gauß überprüft. Hierfür wurde ein Pulvergemisch, wie es nach einem Fertigungsprozess vorliegt, verwendet und mit einer Schaufel in kleinen Mengen über den Stab gestreut. Dieser Vorgang wurde mehrfach wiederholt, wobei nach dem ersten Separieren eine Charge gebildet wurde, welche mehrheitlich die Kupferlegierung enthielt und eine Charge, welche einen größeren Anteil an Stahlwerkstoff enthielt. Nach jeder Iteration wurde eine Probe entnommen und mithilfe einer EDX-Analyse auf ihre Zusammensetzung untersucht.

Auswertung der Ergebnisse

Die Erstellung der Analyse erfolgte entsprechend dem in Abschnitt 3.2.2. Die Ergebnisse der EDX-Analysen sind in Abbildung 11-3 zu sehen.

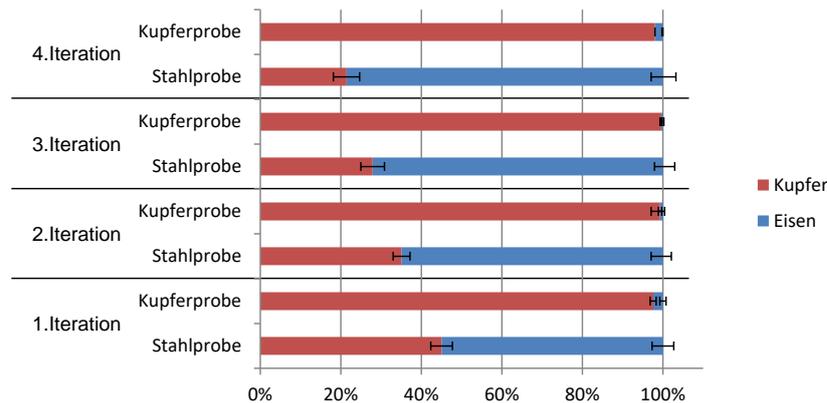


Abbildung 11-3: Ergebnisse der EDX-Auswertung der Pulverproben zur Analyse der Trennbarkeit von Kupferlegierung CW106C und Werkzeugstahl 1.2709

Es zeigt sich, dass eine Separierung der Kupferlegierung CW106C aus 1.2709 deutlich einfacher ist als umgekehrt. So wird hier bereits nach der ersten Wiederholung eine Reinheit von 97,85 % erreicht. Bei der maximal durchgeführten Anzahl an Wiederholungen (vier), kann die Reinheit auf 98,5 % gesteigert werden. Im Gegensatz hierzu wird für 1.2709 nur eine Reinheit von 78,58 % erreicht.

Parallel zu den Untersuchungen zeigte sich, dass die Menge des getrennten Pulverwerkstoffs mit jedem Trennvorgang deutlich abnimmt.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt in der Kohäsivität der Pulverwerkstoffe in Verbindung mit der geringen Masse der einzelnen Pulverkörner. So werden beim Trennvorgang zwar alle Eisen-basierten Partikel aus dem Pulvergemisch vom Magnetstab angezogen, jedoch werden hierbei CW106C-Partikel, welche von 1.2709 umgeben sind, mitgerissen und befinden sich dann ebenfalls am Magnetstab. Ein mehrfaches Verschieben des Magneten bewirkt zwar ein Freisetzen von CW106C-Partikeln, jedoch werden nicht alle Partikel freigegeben, sodass immer noch eine Restverschmutzung vorliegt (siehe Abbildung 11-4).

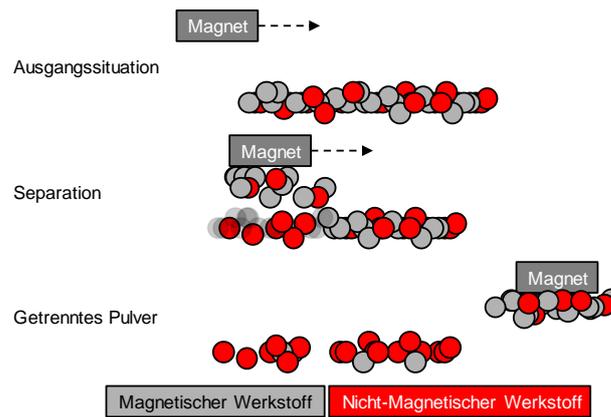


Abbildung 11-4: Schematische Darstellung des Separationsvorgangs

Ein weiterer wichtiger Prozessschritt, um Bauteile nach der Fertigung einsetzen zu können, ist die Wärmenachbehandlung. Diese erfolgt zum einen, um innere Spannungen zu reduzieren, zum anderen um danach die gewünschten mechanischen Eigenschaften einzustellen. Je nach Werkstoff sind hierfür unterschiedliche Temperatur-Zeit-Verläufe notwendig, um die optimalen Eigenschaften einzustellen. Für Multimaterialbauteile gilt es zu überprüfen, in wieweit es möglich ist, eine Wärmenachbehandlungsstrategie für alle Bereiche des Multimaterialbauteils zu finden. Da hierzu jedoch weitreichende Untersuchungen notwendig sind, wird dies an dieser Stelle nicht betrachtet.

Fazit

Aufgrund des hohen Materialeinsatzes ist es für eine wirtschaftliche Produktion notwendig, nicht verfestigtes Material wieder trennen zu können. Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, den Werkzeugstahl und die Kupferlegierung mit einer Reinheit von 98,5 % im Falle der Kupferlegierung sowie 78,6 % für den Werkzeugstahl wieder zu trennen. Um zu überprüfen, ob diese Reinheitsgrade ausreichen für eine Wiederverwendung, sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Hierbei muss bestimmt werden, welche Auswirkungen ggf. restliche Fremdpartikel im Pulver auf den Prozess sowie die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs haben. Auch für weitere Materialkombinationen, die nicht aufgrund unterschiedlicher magnetischer Eigenschaften getrennt werden können, ist es notwendig, Separierungskonzepte zu entwickeln. Kann dies nicht gelingen, stellt dies einen limitierenden Faktor für eine industrielle Umsetzung der Technologie dar.

11.4 Versuchspläne

Tabelle 11-1: Versuchsplan zur Validierung der Prozessparameter für 1.2709

Probenr.	h	S_a	P_L	v_s
-	mm	mm	W	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
1	0,03	0,175	100	140
2	0,03	0,175	175	760
3	0,03	0,175	150	760
4	0,03	0,175	200	760
5	0,03	0,175	175	600
6	0,03	0,175	175	900
7	0,03	0,175	137	450
8	0,03	0,175	119	295
9	0,03	0,175	156	605
10	0,03	0,175	225	760
11	0,03	0,175	225	750
12	0,03	0,175	250	750
13	0,03	0,175	275	750
14	0,03	0,175	225	650
15	0,03	0,175	175	600
16	0,03	0,175	200	600
17	0,03	0,175	225	600
18	0,03	0,105	187	600
19	0,03	0,105	187	700
20	0,03	0,105	150	600
21	0,03	0,105	187	600
22	0,03	0,105	187	500
23	0,03	0,105	200	600
24	0,03	0,105	225	600
25	0,03	0,090	187	600
26	0,03	0,120	175	550
27	0,03	0,120	175	450
28	0,03	0,120	200	550
29	0,03	0,120	225	550
30	0,03	0,100	175	550
31	0,03	0,105	187	600
32	0,03	0,105	187	500
33	0,03	0,105	200	600
34	0,03	0,105	225	600
35	0,03	0,090	187	600
36	0,03	0,120	175	550
37	0,03	0,120	175	450
38	0,03	0,120	200	550

39	0,03	0,120	225	550
40	0,03	0,100	175	550

Tabelle 11-2: Versuchsplan zur Qualifizierung der Kupferlegierung CW106C

Probennr.	h mm	1. Belichtung			2. Belichtung		
		s _a mm	P _L W	v _s $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	s _a mm	P _L W	v _s $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
1	0,03	0,075	400	100			
2	0,03	0,1	400	100			
3	0,03	0,125	400	100			
4	0,03	0,15	400	100			
5	0,03	0,175	400	100			
6	0,03	0,2	400	100			
7	0,03	0,075	400	200			
8	0,03	0,1	400	200			
9	0,03	0,125	400	200			
10	0,03	0,15	400	200			
11	0,03	0,175	400	200			
12	0,03	0,2	400	200			
13	0,03	0,075	400	300			
14	0,03	0,1	400	300			
15	0,03	0,125	400	300			
16	0,03	0,15	400	300			
17	0,03	0,175	400	300			
18	0,03	0,2	400	300			
19	0,03	0,075	400	400			
20	0,03	0,1	400	400			
21	0,03	0,125	400	400			
22	0,03	0,15	400	400			
23	0,03	0,175	400	400			
24	0,03	0,2	400	400			
25	0,03	0,075	400	500			
26	0,03	0,1	400	500			
27	0,03	0,125	400	500			
28	0,03	0,15	400	500			
29	0,03	0,175	400	500			
30	0,03	0,2	400	500			
31	0,03	0,075	400	600			
32	0,03	0,1	400	600			
33	0,03	0,125	400	600			
34	0,03	0,15	400	600			
35	0,03	0,175	400	600			
36	0,03	0,2	400	600			
37	0,03	0,075	400	300			
38	0,03	0,075	400	400			
39	0,03	0,075	400	500			
40	0,03	0,075	400	600			

41	0,03	0,100	400	300			
42	0,03	0,100	400	600			
43	0,03	0,125	400	400			
44	0,03	0,125	400	600			
45	0,03	0,150	400	200			
46	0,03	0,150	400	300			
47	0,03	0,125	400	400			
48	0,03	0,125	400	400	0,125	400	400
49	0,03	0,125	400	300			
50	0,03	0,1	400	400			
51	0,03	0,075	400	400			
52	0,03	0,075	400	400	0,075	400	400
53	0,03	0,125	400	600			
54	0,03	0,125	400	600	0,125	400	600
55	0,03	0,125	400	500			
56	0,03	0,1	400	600			
57	0,03	0,125	400	400			
58	0,03	0,125	400	400	0,125	400	400
59	0,03	0,125	400	300			
60	0,03	0,1	400	400			
61	0,03	0,075	400	400			
62	0,03	0,075	400	400	0,075	400	400
63	0,03	0,125	400	600			
64	0,03	0,125	400	600	0,125	600	400
65	0,03	0,125	400	500			
66	0,03	0,1	400	600			

Tabelle 11-3: Versuchsplan zur Qualifizierung der Aluminiumlegierung EN AC-43400

Probennr.	s _a mm	h mm	P _L W	v _s <u>mm</u> s
1	0,2	0,03	300	1725
2	0,2	0,03	300	1600
3	0,2	0,03	250	1400
4	0,2	0,03	250	1300
5	0,2	0,03	200	1300
6	0,2	0,03	200	1200
7	0,2	0,03	180	1035
8	0,2	0,03	180	1000
9	0,2	0,03	150	900
10	0,2	0,03	300	1600
11	0,2	0,03	300	1500
12	0,2	0,03	300	1400
13	0,2	0,03	250	1300
14	0,2	0,03	250	1200
15	0,2	0,03	250	1100
16	0,2	0,03	350	1700
17	0,2	0,03	350	1800
18	0,2	0,03	350	1900
19	0,15	0,03	250	1400
20	0,15	0,03	300	1500
21	0,15	0,03	350	1600
22	0,17	0,03	250	1400
23	0,17	0,03	300	1500
24	0,17	0,03	350	1600
25	0,2	0,03	250	1400
26	0,2	0,03	300	1500
27	0,2	0,03	350	1600

Tabelle 11-4: Versuchsplan zur Analyse makroskopischer Effekte des Multimaterialprozesses aus 1.2709 und CW106C

Proben- nr.	Erstes Material	Zweites Material	Drittes Material	Prozessunter- bre- chung
1	1.2709	CW106C	-	ja
2	1.2709	CW106C	-	ja
3	1.2709	CW106C	1.2709	ja
4	1.2709	CW106C	1.2709	ja
5	CW106C	1.2709	-	ja
6	CW106C	1.2709	-	ja
7	CW106C	1.2709	CW106C	ja
8	CW106C	1.2709	CW106C	ja
9	CW106C	1.2709	-	nein
10	CW106C	1.2709	-	nein
11	CW106C	1.2709	CW106C	nein
12	CW106C	1.2709	CW106C	nein
13	1.2709	CW106C	-	nein
14	1.2709	CW106C	-	nein
15	1.2709	CW106C	1.2709	nein
16	1.2709	CW106C	1.2709	nein

Tabelle 11-5: Versuchsplan zur Analyse mikroskopischer Effekte des Multimaterialprozesses CW106C und 1.2709

Probennr.	S _a	h _s	P _L	V _s
-	mm	mm	W	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
1		0,03	200	600
2		0,03	233	600
3		0,03	267	600
4		0,03	300	600
5		0,03	333	600
6		0,03	367	600
7		0,03	400	600

Tabelle 11-6: Versuchsplan zur Herstellung von 3-D-Multimaterialproben aus Kupferlegierung CW106C und Stahl 1.2709

Probenr.	Räumliche Anordnung	Belichtungsreihenfolge	Größe des Übergangsbereichs	Belichtungsmuster
-				
1	2	2	3	2
2	1	2	3	2
3	2	2	3	2
4	1	2	3	2
5	2	2	3	2
6	1	2	3	2
7	2	2	3	2
8	1	2	3	2
9	2	1	3	2
10	1	1	3	2
11	2	1	3	2
12	1	1	3	2
13	2	1	3	2
14	1	1	3	2
15	2	1	3	2
16	1	1	3	2
17	2	1 oder 2	2	2
18	2	1 oder 2	2	2
19	2	1 oder 2	2	2
20	2	1 oder 2	4	2
21	2	1 oder 2	4	2
22	2	1 oder 2	4	2
23	2	1 oder 2	5	2
24	2	1 oder 2	5	2
25	2	1 oder 2	5	2
26	2	1 oder 2	2	3
27	2	1 oder 2	2	3
28	2	1 oder 2	2	3
29	2	1 oder 2	4	3
30	2	1 oder 2	4	3
31	2	1 oder 2	4	3
32	2	1 oder 2	5	3
33	2	1 oder 2	5	3
34	2	1 oder 2	5	3
35	2	1 oder 2	2	4

36	2	1 oder 2	2	4
37	2	1 oder 2	2	4
38	2	1 oder 2	4	4
39	2	1 oder 2	4	4
40	2	1 oder 2	4	4
41	2	1 oder 2	5	4
42	2	1 oder 2	5	4
43	2	1 oder 2	5	4
44	2	1 oder 2	2	5
45	2	1 oder 2	2	5
46	2	1 oder 2	2	5
47	2	1 oder 2	4	5
48	2	1 oder 2	4	5
49	2	1 oder 2	4	5
50	2	1 oder 2	5	5
51	2	1 oder 2	5	5
52	2	1 oder 2	5	5
53	2	3	2	3
54	2	3	2	3
55	2	3	2	3
56	2	3	4	3
57	2	3	4	3
58	2	3	4	3
59	2	3	5	3
60	2	3	5	3
61	2	3	5	3
62	2	2	2	3
63	2	2	2	3
64	2	2	2	3
65	2	2	4	3
66	2	2	4	3
67	2	2	4	3
68	2	2	5	3
69	2	2	5	3
70	2	2	5	3
71	2	1	2	2
72	2	1	2	2
73	2	1	2	2
74	2	1	4	2
75	2	1	4	2
76	2	1	4	2
77	2	1	5	2
78	2	1	5	2
79	2	1	5	2

Tabelle 11-7: Legende zur Erläuterung des Versuchsplans

Räumliche Anordnung	<i>Kern</i>	<i>Hülle</i>	
1	Stahl	Kupfer	
2	Kupfer	Stahl	
Belichtungsreihenfolge	1.	2.	3.
1	Stahl	Kupfer	Kupfer
2	Stahl	Kupfer	Übergangsparameter
3	Stahl	Übergangsparameter	Kupfer
4	Kupfer	Stahl	klären
5	Kupfer	Stahl	Übergangsparameter
6	Kupfer	Übergangsparameter	Stahl
Gestaltung Übergangsbereich			
1	kein Übergangsbereich		
2	Übergangsbereich		
3	Überbrückung		
4	Schachbrett		
5	Verzahnung		
Größe des Übergangsbereichs	<i>Größe in mm</i>		
1	0		
2	0,1		
3	0,2		
4	0,4		
5	0,7		

Tabelle 11-8: Parameterstudie zur Optimierung des Anbindungsverhaltens von Kupferlegierung CW106C auf EN AC-43400

Proben- nr.	s _a mm	h _s mm	P _L W	v _s $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
1	0,1	0,03	400	800
2	0,1	0,03	400	900
3	0,1	0,03	400	1000
4	0,1	0,03	400	1100
5	0,1	0,03	400	1200
6	0,1	0,03	400	1300
7	0,1	0,03	400	1400
8	0,1	0,03	400	1500
9	0,1	0,03	400	1600

Tabelle 11-9: Parameterstudie zur Herstellung von Sandwichstrukturen aus Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400 mit einem optimierten Anbindungsverhalten

Würfel Nr.	s _a mm	h _s mm	P _L W	v _s $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	Anbin- dung mm	P _L W	v _s $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
1	0,1	0,03	400	400	0,15	400	1600
2	0,1	0,03	400	600	0,15	400	1600
3	0,1	0,03	400	800	0,15	400	1600
4	0,1	0,03	400	400	0,3	400	1600
5	0,1	0,03	400	600	0,3	400	1600
6	0,1	0,03	400	800	0,3	400	1600

Tabelle 11-10: Parameterstudie zur Verarbeitung von einer Pulvermischung aus Kupferlegierung CW106C und EN AC-43400 in einem gleichmäßigen Mischungsverhältnis

Würfel Nr.	s _a mm	h _s mm	P _L W	v _s $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
1	0,12	0,03	350	800
2	0,12	0,03	350	850
3	0,12	0,03	350	900
4	0,12	0,03	350	950
5	0,12	0,03	350	1000
6	0,12	0,03	350	1050
7	0,12	0,03	350	1100
8	0,12	0,03	350	1150
9	0,12	0,03	350	1200

11.5 Auswahl eines Auftragskonzepts

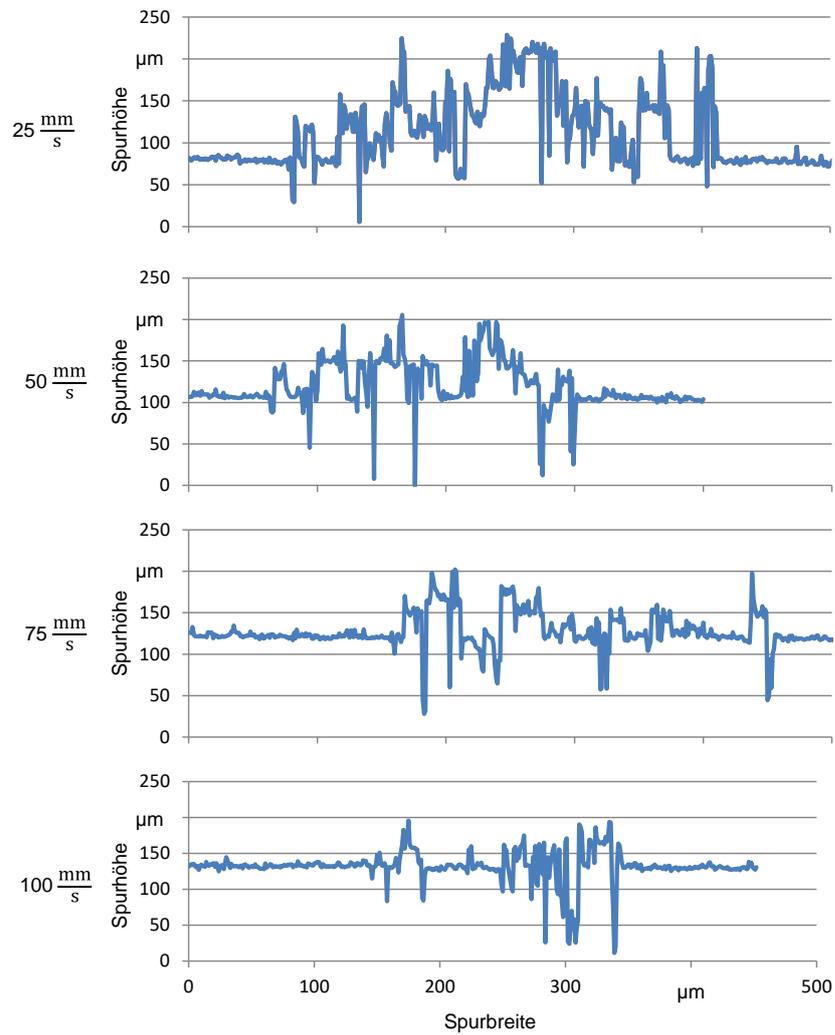


Abbildung 11-5: Höhenprofile der Pulverspuren aus Abbildung 11-1 bei unterschiedlichen Ablegegeschwindigkeiten

Tabelle 11-11: Ergebnis der Auswahl einer Auftragskonzepts

	Lokal		Flächig			
	mit Absaugung	ohne Absaugung	mit Absaugung	ohne Absaugung		
			Multisystem	Monosystem		
Bauteil-eigenschaften	Pulverbett-qualität	2	2	1	3	2
	Querkontamination	1	2	1	2	1
	Abbildgenauigkeit	3 (0,2 mm)	3 (0,2 mm)	2 (0,1 mm)	3 (0,2 mm)	1 (600 dpi)
Technologische Anforderungen	Pulvereigenschaften	3	3	2	3	1
	Werkstoffeigenschaften	1	1	1	1	2
Wirtschaftliche Aspekte	Auftragsdauer	5 (10,54 h)	4 (3,09 h)	3 (1,17 h)	1 (0,46 h)	2 (1,11 h)
	Pulverdurchmischung	1	1	2	1	1
Gesamtbetrachtung	16	13	12	14	9	

11.6 Materialqualifizierung CW106C

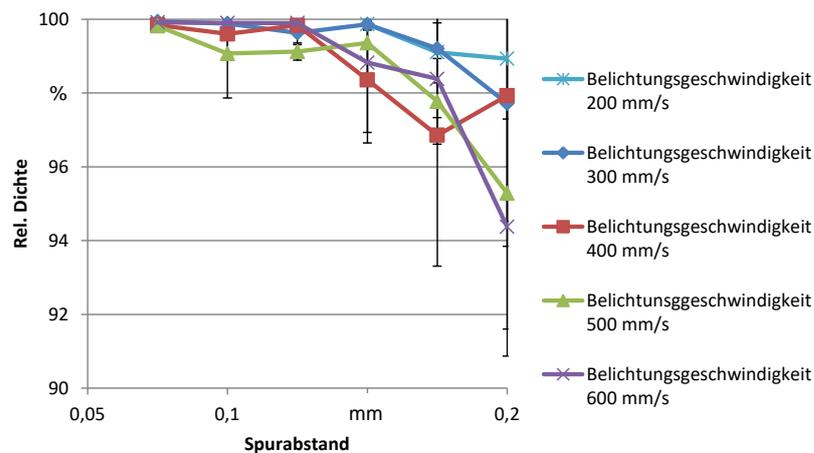


Abbildung 11-6: Relative Dichte in Abhängigkeit des Spurbstands und der Belichtungsgeschwindigkeit bei der Verarbeitung der Kupferlegierung CW106C

11.7 Aufgetretene Fehlerbilder im Rahmen der Arbeit

Abhängig von unterschiedlichen Fehlerbildern müssen unterschiedliche Parameter in einem Multimaterialprozess optimiert werden. Im Folgenden werden bisher aufgetretene Fehlerbilder mit entsprechenden Gegenmaßnahmen vorgestellt, sodass eine zeiteffiziente Optimierung der Prozessparameter erfolgen kann.

a) Fehlstellen im Übergangsbereich

Abbildung 11-7 zeigt eine schematische Darstellung dieses Fehlerbildes. Es ist mit dem in Abbildung 6-21: Schliffbilder in der Bauebene von Probekörpern mit unterschiedlicher Belichtungsreihenfolge und unterschiedlich großem Übergangsbereich. Jeweils außen Werkzeugstahl und innen Kupferlegierung CW106C in der ersten Reihe vergleichbar. Es sind unregelmäßige, aber deutlich erkennbare Fehlstellen zwischen den beiden werkstoffspezifischen Bereichen zu erkennen. Diese Fehlstellen verlaufen unregelmäßig vornehmlich entlang des Übergangs von Material A zu Material B.

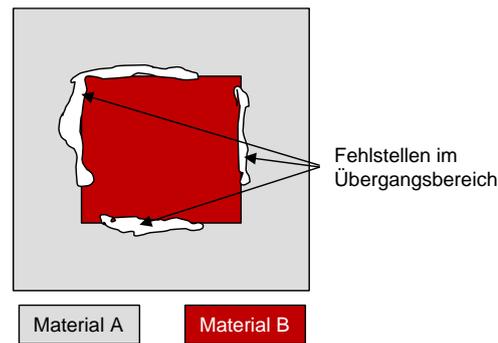


Abbildung 11-7: Schematische Darstellung des Fehlerbildes „Fehlstellen im Übergangsbereich“

Ergeben sich Fehlstellen, so ist die Größe des Übergangsbereichs zu klein gewählt worden. Aufgrund unterschiedlicher thermo-mechanischer Eigenschaften, wie beispielsweise dem Wärmeausdehnungskoeffizienten, ergibt sich eine unterschiedlich starke Schrumpfung in den verschiedenen werkstoffspezifischen Bereichen. Um dies zu kompensieren, muss der Übergangsbereich vergrößert werden (vgl. Abschnitt 6.3.3).

b) Risse in einem werkstoffspezifischen Bereich nahe des Übergangsbereichs

Das zweite Fehlerbild „Risse in einem werkstoffspezifischen Bereich nahe des Übergangsbereichs“ zeichnet sich durch ein Netzwerk aus feinen Rissen in der Wärmeeinflusszone aus (siehe Abbildung 11-8).

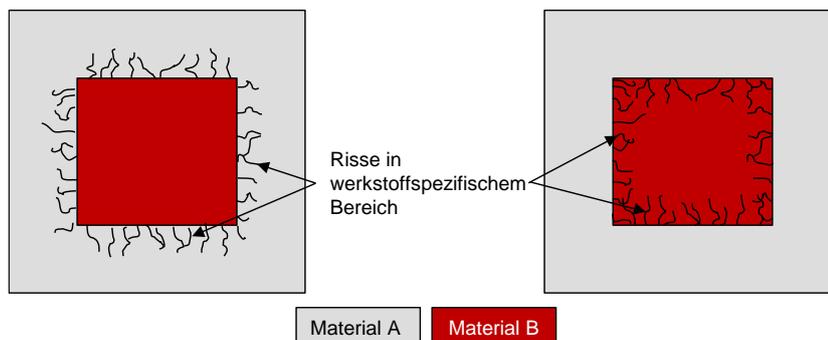


Abbildung 11-8: Schematische Darstellung des Fehlerbildes „Risse in werkstoffspezifischem Bereich nahe des Übergangs“

Hier ist die Ursache in unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe zu suchen. Aufgrund dieser verändert sich der Temperaturgradient während des Laserstrahlschmelzprozesses, wodurch größere Eigenspannungen in den werkstoffspezifischen Bereichen entstehen können.

Um dies zu vermeiden, sollten diese zwei Ansätze verfolgt werden:

- 1) Veränderung der Belichtungsreihenfolge, um den Einfluss von unterschiedlichen thermischen Eigenschaften, wie beispielsweise eine hohe Wärmeleitfähigkeit des einen Materials im Vergleich zu einer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit des anderen Materials, zu minimieren
- 2) Einsatz von Re-Melting (Erläuterung siehe Abschnitt 6.3.2.1, um entstehende Eigenspannungen gezielt zu reduzieren

c) *Risse im werkstoffspezifischen Bereich*

Eine weitere Ursache für Risse können Fremdpartikel sein. Diese führen zu Rissen in einem werkstoffspezifischen Bereich, wie in Abbildung 11-9 schematisch gezeigt.

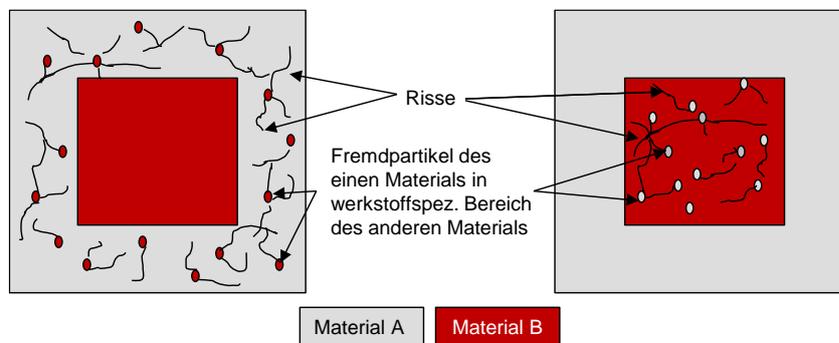


Abbildung 11-9: Schematische Darstellung des Fehlerbildes „Fremdpartikel“

Ursache für die Rissentstehung können beispielsweise veränderte Prozessparameter infolge eines veränderten Absorptionsverhaltens der Laserenergie sein (SCHULZE 2010). Auch können Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Werkstoffen auftreten, wie ein Anlagern von Legierungselementen an Korngrenzen (LIU ET AL. 2014) oder das Entstehen einer Flüssigmetallversprödung ((VDI-Richtlinie 3822 Blatt 1.6, SCHULZE 2010)).

Die Fremdpartikel können beispielsweise mittels EDX-Analyse bestimmt werden. Können diese Partikel festgestellt werden, muss im nächsten Schritt der Pulverauftrag bzw. das Entfernen der Pulverpartikel so optimiert werden, dass keine Übertragung von Partikeln des Materials A in den Bereich des Materials B bzw. andersherum erfolgen kann.

d) *Poren im Übergangsbereich*

Schließlich können noch Poren im Übergangsbereich entstehen (vgl. Abbildung 11-10). Diese lassen sich mithilfe eines Mikroskopiebildes identifizieren.

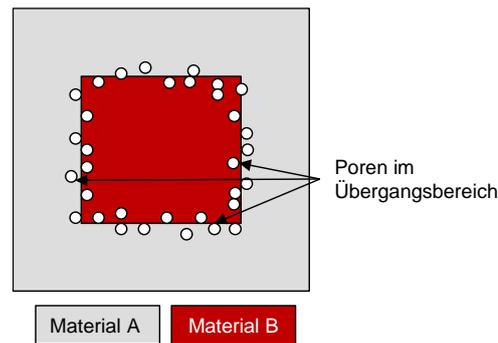


Abbildung 11-10: Schematische Darstellung des Fehlerbildes „Poren im Übergangsbereich“

Ursächlich für die runden Poren können Gaseinschlüsse infolge eines zu hohen Energieeintrags sein. Mit dem Ziel dies zu vermeiden, kann für den Übergangsbereich ein dritter Parametersatz verwendet werden. Somit können die veränderten Randbedingungen im Übergangsbereich durch eine reduzierte Schichthöhe sowie durch abweichende thermische und thermo-mechanische Eigenschaften berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 4). Um einen geeigneten Parametersatz zu identifizieren, kann wie schon bei der Qualifizierung der Monomaterialien auf bestehende Vorgehensweisen verwiesen werden (YADROITSEV ET AL. 2015).

e) *Kombination der genannten Fehlerbilder*

Neben den gerade aufgeführten Fehlerbildern ist es auch möglich, dass es zu Kombinationen von zwei oder mehr Fehlerbildern kommt. Beispielsweise kann es vorkommen, dass a) und b) oder c) und d) gleichzeitig auftreten. In diesem Fall sollte systematisch ein Fehlerbild nach dem anderen behoben werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass ein Fehlerbild ggf. ein anderes mithervorrufen oder dessen Auftreten verhindern kann. Zum Beispiel können Querkontaminationen in einem materialspezifischen Bereich dazu führen, dass im Übergangsbereich keine Risse infolge unterschiedlicher thermischer Eigenschaften entstehen.

11.8 Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Tabelle 11-12: Sieb- und Trennraten zur Aufbereitung des Pulverwerkstoffe

	Einheit	Wert
Siebrate	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	40
Trennrate	$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	20

Tabelle 11-13: Adaptionen des Zeitmodells von KAMPS ET AL. 2018 zur Analyse des Multimaterialprozesses mittels LBM

Prozessschritt	KAMPS ET AL. 2018	Adaption
Daten- vorbe- reitung	Abhängig vom Automatisierungsgrad in drei Stufen (niedrig, mittel, hoch)	Keine Veränderung im Zeitmodell
Baupro- zess- vorbe- reitung	Abhängig vom Automatisierungsgrad in drei Stufen (niedrig, mittel, hoch)	Keine Veränderung
Heizen und Fluten		<ul style="list-style-type: none"> • Geschätzte Dauer: eine Stunde-Konstant für alle Fertigungsprozesse
Baupro- zess	<p><i>Auftragsdauer:</i></p> <p>Wird von einem Material bestimmt</p>	<p><i>Auftragsdauer:</i></p> <p>Addiert sich aus Auftragsdauer für jedes einzelne Material und der Zeit zur Pulverentfernung</p>
	<p><i>Verfestigungsrate:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung der Verfestigungszeit eines Werkstoffs • Berechnung entsprechend BUCHBINDER ET AL. • Keine Berücksichtigung eines Konturparameters 	<p><i>Verfestigungsrate:</i></p> <p>Berücksichtigung der Verfestigungsrate für die eingesetzten Prozessparameter</p>

	<i>Verfestigungszeit:</i>	<i>Verfestigungszeit:</i>
	Entsprechend ZHANG & BERNARD	Berücksichtigung der Verfestigungsrate entsprechend dem Volumenanteil jedes Werkstoffs
Abkühlen	Abhängig von Produktionsprozessen; hier konstant bei drei Stunden	Keine Adaptionen
Nachbereitung Maschine	Abhängig vom Automatisierungsgrad in drei Stufen (niedrig, mittel, hoch)	Keine Adaptionen
Nachbereitung Pulver	Berücksichtigung des Siebvorgangs	Entwicklung und Integration eines Modells zur Pulvertrennung
Nachbereitung Bauteil		Keine Adaptionen

Tabelle 11-14: Berücksichtigte Pulververluste

k_{Verlust} (Siebstation)	10 %
Fixe Verluste	0,2 Kg
Siebverluste	
Trennverluste	
Sicherheitsfaktor S	5 %

Tabelle 11-15: Pulververluste im Fertigungsprozess in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad

Grad der Automatisierung	Fixe Pulververluste w_{fix}	Variable Pulververluste w_{variabel}
Hoch	$0,2 \frac{\text{kg}}{\text{Batch}}$	20 %
Mittel	$0,2 \frac{\text{kg}}{\text{Batch}}$	65 %
Niedrig	$0,2 \frac{\text{kg}}{\text{Batch}}$	80 %

Tabelle 11-16: Betriebszeiten für Subprozesse in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad

Grad der Automatisierung	Datenvorbereitung	Bauprozessvorbereitung	Nachbereitung Maschine	Bedienzeit Bauprozess	Bedienzeit Pulvernachbereitung
	Absolut	Absolut	Absolut	Anteilig an Maschinenstunden	Anteilig an Maschinenstunden
Hoch	0,5 h	0,25 h	0,25 h	0,05	0,2
Mittel	1 h	0,75 h	0,75 h	0,075	0,3
Niedrig	2 h	1,5 h	1,5 h	0,1	0,4

Tabelle 11-17: Daten zur Berechnung des Maschinenstundensatzes einer LBM-Anlage

	Einheit	Wert	Quelle
Wiederbeschaffungswert LBM-Anlage	€	475.000	KAMPS ET AL. 2018
Wiederbeschaffungswert Peripherie LBM-Anlage	€	130.000	
Wirtschaftliche Nutzungsdauer	Jahre	8	OTT 2012
Maschinenverfügbarkeit	%	75	GIBSON ET AL. 2010
Produktionsstunden pro Jahr	h	2.000	GIBSON ET AL. 2010
Verzinsung	%	8	KAMPS ET AL. 2018
Flächenbedarf (inkl. Peripherie)	m ²	84	
Mietkosten	$\frac{€}{m^2}$	130	KAMPS ET AL. 2018
Durchschnittlicher Energieverbrauch	kW	4	
Energiekosten	$\frac{€}{kWh}$	0,15	KAMPS ET AL. 2018
Wartungskosten	$\frac{€}{a}$	30.000	KAMPS ET AL. 2018

Tabelle 11-18: Daten zur Berechnung des Maschinenstundensatzes zur Nachbereitung des Pulvers

	Einheit	Wert	Quelle
Wiederbeschaffungswert LBM-Anlage	€	50.000	
Wirtschaftliche Nutzungsdauer	a	8	OTT 2012
Maschinenverfügbarkeit	%	75	GIBSON ET AL. 2010
Produktionsstunden pro Jahr	h	2.000	GIBSON ET AL. 2010
Verzinsung	%	8	KAMPS ET AL. 2018
Flächenbedarf (inkl. Peripherie)	m ²	30	
Mietkosten	$\frac{€}{m^2}$	130	KAMPS ET AL. 2018
Durchschnittlicher Energieverbrauch	kW	4	
Energiekosten	$\frac{€}{kWh}$	0,15	KAMPS ET AL. 2018
Wartungskosten	$\frac{€}{a}$	5.000	KAMPS ET AL. 2018

Tabelle 11-19: Daten zur Berechnung des Mitarbeiterstundensatzes zur Anlagenbedienung

Anteilige Kosten	%	Durchschnittlicher Stundensatz in $\frac{\text{€}}{\text{h}}$
Grundlohn Mitarbeiter		21,00
Kompensation freier Arbeitstage	19	3,99
Sonderzahlungen	9	1,89
Anteil zur Arbeitssicherheit	19	3,99
Betriebsrente	5	1,05
Weitere Personalkosten	6	1,26
Brutto-Mitarbeiterstundensatz		33,18
Steuern	19	6,30
Netto-Mitarbeiterstundensatz		39,48

Tabelle 11-20: Daten zur Berechnung des Mitarbeiterstundensatzes von Ingenieuren

Anteilige Kosten	%	Durchschnittlicher Stundensatz in $\frac{\text{€}}{\text{h}}$
Grundlohn Mitarbeiter		37,00
Kompensation freier Arbeitstage	19	7,03
Sonderzahlungen	9	3,33
Anteil zur Arbeitssicherheit	19	7,03
Betriebsrente	5	1,85
Weitere Personalkosten	6	2,22
Brutto Mitarbeiterstundensatz		58,46
Steuern	19	11,11
Netto Mitarbeiterstundensatz		69,57

12 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Fraunhofer IGCV in den Jahren 2014 bis 2018 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Multimaterialverarbeitung 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
Brand	Markus	Methodische Entwicklung eines Auftragsmechanismus zur Multimaterialverarbeitung für die pulverbettbasierte additive Fertigung
Grimm	Daniel	Entwicklung und Erprobung eines Sauger-Konzeptes zur gezielten Entfernung von Pulverschichten im Laserstrahlschmelzprozess
Höfler	Bernd	Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Pulverauftragsmechanismus im Bereich der additiven Fertigung
Höfler	Bernd	Qualifizierung und Fertigung von gradierten Werkstoffübergängen aus Kupferlegierung CW106C und 1.2709
Kraus	Manuel	Mechanische Eigenschaften einer additiv gefertigten Multimaterialkombination aus Kupferlegierung CW106C und 1.2709
Krohmer	Erwin	Methodische Entwicklung eines Auftragsmechanismus zur Multimaterialverarbeitung für die pulverbettbasierte additive Fertigung
Lidl	Stefan	Economic analysis of multi-material treatment in powder bed based selective laser melting
Mair	Markus	Systematische Untersuchung des Pulverauftrags mittels pneumatischer Düsen zur additiven Fertigung von Multimaterialbauteilen
Maurer	Niklas	Qualifizierung von Kupferlegierung CW106C für das selektive Laserstrahlschmelzen
Mirthes	Sebastian	Herstellung von Multimaterialbauteilen mittels selektivem Laserstrahlschmelzen (SLM) mit anschließenden Untersuchungen zur Wärmebehandlung
Schafnitzel	Mario	Laserstrahlschmelzen von Multimaterialbauteilen
Wehner	Fabian	Untersuchungen zur Multimaterialverarbeitung von Kupferlegierung CW106C und X3NiCoMoTi18-9-5 im Laserstrahlschmelzprozess