

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

## **Qualitätsorientiertes und modellbasiertes Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen**

**Max Lutter-Günther**

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. Johannes Heinrich Schleifenbaum

Die Dissertation wurde am 23.12.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 17.08.2020 angenommen.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Laserstrahlschmelzen im produktionstechnischen Kontext	1
1.1.1 Potenziale des Laserstrahlschmelzens	1
1.1.2 Qualitätssicherung als zentrale Herausforderung	2
1.2 Motivation und Problemstellung	3
1.2.1 Bedeutung des Pulverrecyclings	3
1.2.2 Anwendung des Pulverrecyclings und Hemmnisse	4
1.3 Zielsetzung der Arbeit	4
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	6
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Definition zentraler Begriffe	9
2.2 Laserstrahlschmelzen	10
2.2.1 Verfahrensprinzip	11
2.2.2 Prozesskette	16
2.2.3 Pulvermanagement	17
2.3 Eigenschaften von Metallpulvern für das Laserstrahlschmelzen	19
2.3.1 Primäre Pulvereigenschaften	20
2.3.2 Sekundäre Pulvereigenschaften	26
2.4 Qualitätssicherung in der Produktion	27
2.4.1 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)	27
2.4.2 Statistische Prozesslenkung	27
2.5 Fazit	28
<b>3 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>29</b>
3.1 Einfluss von Pulverrecycling auf die Pulver- und Bauteilqualität	29

3.1.1	Titanlegierungen	29
3.1.2	Aluminiumlegierungen	32
3.1.3	Nickelbasislegierungen	33
3.1.4	Stähle	34
3.1.5	Fazit	37
3.2	Einbringung von Prozessspritzern	39
3.2.1	Entstehung von Prozessspritzern	39
3.2.2	Bedeutung für die Bauteilqualität	40
3.3	Interaktion von Umgebungsfeuchte und Pulvermaterial	42
3.3.1	Adsorption und Desorption von Feuchtigkeit	42
3.3.2	Reaktionen mit Umgebungsfeuchte an der Partikeloberfläche	43
3.4	Produktionstechnische Umsetzung des Pulverrecyclings	44
3.4.1	Vorgehen beim Sieben	45
3.4.2	Anwendung von Pulvermischkonzepten	46
3.4.3	Einschränkung des Pulverrecyclings	47
3.5	Fazit	48
3.5.1	Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse	48
3.5.2	Handlungsbedarf	49
<b>4</b>	<b>Identifizierung und Kategorisierung von Änderungseffekten</b>	<b>51</b>
4.1	Herleitung hypothetischer Änderungseffekte	52
4.1.1	Systemdefinition	52
4.1.2	Einwirkungen auf das Pulver entlang der Prozesskette	53
4.2	Experimentelle Analyse der Änderungseffekte	55
4.2.1	Effekte im Laserstrahlschmelzprozess	57
4.2.2	Effekte bei der Lagerung und Handhabung	70
4.3	Bewertung der Änderungseffekte	77
4.3.1	Vermeidbarkeit	77
4.3.2	Kategorisierung	78

---

4.4	Fazit	80
4.4.1	Zusammenfassung	80
4.4.2	Handlungsbedarf	81
<b>5</b>	<b>Modellierung der Zustandsänderung durch das Pulverrecycling</b>	<b>83</b>
5.1	Modellzweck und Anforderungen	83
5.2	Übersicht der Modellebenen	84
5.3	Baujob-Ebene	85
5.3.1	Berechnungsansatz	86
5.3.2	Mathematische Beschreibung	88
5.4	Pulverchargen-Ebene	93
5.4.1	Berechnungsansatz	93
5.4.2	Mathematische Beschreibung	94
5.5	Kalibrierung des Modells	97
5.5.1	Konzept	98
5.5.2	Konfiguration von Kalibrierjob und Auffangbehältern	100
5.5.3	Vorgehen bei der Kalibrierung	101
5.6	Validierung des Modells	103
5.6.1	Plausibilität der Kalibrierung	103
5.6.2	Reproduzierbarkeit der Kalibrierung	109
5.6.3	Genauigkeit der Vorhersage	110
5.7	Evaluierung des Modells	113
5.7.1	Erfüllung der Anforderungen	113
5.7.2	Reflexion und kritische Betrachtung	114
5.8	Fazit	115
<b>6</b>	<b>Methode zur Bewertung von Pulverrecyclingstrategien</b>	<b>117</b>
6.1	Anforderungen	117
6.1.1	Funktionale Anforderungen	118
6.1.2	Nichtfunktionale Anforderungen	119

6.2	Gültigkeitsbereich und Annahmen	119
6.3	Morphologischer Kasten der Pulverrecyclingstrategie	120
6.4	Struktur und Ablauf der Methode	121
6.4.1	Übersicht	121
6.4.2	Nutzungsstufen	122
6.4.3	Detaillierung der Schritte	124
6.5	Anwendung der Methode	128
6.5.1	Anwendungsbeispiel Nutzungsstufe 1	128
6.5.2	Anwendungsbeispiel Nutzungsstufe 2	132
6.5.3	Diskussion	136
6.6	Evaluierung der Methode	139
6.6.1	Erfüllung der Anforderungen	139
6.6.2	Reflexion und kritische Betrachtung	141
6.6.3	Aufwand-Nutzen-Betrachtung	143
6.7	Fazit	149
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>151</b>
7.1	Zusammenfassung	151
7.2	Einordnung und Reflexion	152
7.3	Ausblick	154
	<b>Literatur</b>	<b>157</b>
	<b>Anhang</b>	<b>171</b>
A1	Messmethoden	171
A2	Prozessparameter	174
A3	Baujobgeometrie zur Untersuchung von Änderungseffekten für runde Bauflächen	175
A4	Einfluss von Trockenmittel in Lagerbehältern	175
A5	Flussdiagramm: Berechnungsansatz für die Einbringung von Spritzerunterkorn	176
A6	Eingebrachte Studienarbeiten	178

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AF	Adsorption von Feuchtigkeit
AO	Anhaftungen an Oberflächen
AS	Aerosolbildung durch Schutzgasstrom
ASTM	American Society for Testing and Materials
bzw.	beziehungsweise
BSE	Backscattered Electrons
ca.	circa
CAD	Computer-Aided Design
DB	Deagglomeration durch Beschichten
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ESUK	Eingebrachtes Spritzerunterkorn
et al.	et alii
etc.	et cetera
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
IGCV	Einrichtung / Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik
ISO	International Organization for Standardization
IWU	Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
LBM	Laser Beam Melting
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NMOE	Nichtmetallische Oberflächenelemente



---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
OEG	Obere Eingriffsgrenze
OWG	Obere Warngrenze
PE	Polyethylen
PF	Partikelform
PGV	Partikelgrößenverteilung
PRS	Pulverrecyclingstrategie
PT	Personentag
REM	Rasterelektronenmikroskop
RU	Reaktion mit Umgebungsatmosphäre
SE	Spritzerbildung und -einbringung
SGS	Schutzgasstrom
SPC	Statistical Process Control
SUK	Spritzerunterkorn
TO	Thermisch induzierte Oberflächenreaktion
UEG	Untere Eingriffsgrenze
UK	Unterkorn
US	United States
UWG	Untere Warngrenze
v. a.	vor allem
VB	Versintern von Pulverpartikeln in bauteilnahen Bereichen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

## Verzeichnis der Formelzeichen

Variable	Einheit	Bedeutung
$A_{UK}$	%	Unterkornanteil
$B_{BR}$	-	logische Bedingung für die Einbringung im umgebenden Bauraum
$B_{PB}$	-	logische Bedingung für die Einbringung im Pulverbett
$EG$	ppm	Elementgehalt
$EG_{AF}$	ppm	Elementgehalt des Auffrischpulvers
$EG_{ESUK}$	ppm	Elementgehalt des eingebrachten Spritzerunterkorns
$EG_{in}$	ppm	Elementgehalt des Ausgangspulvers
$EG_{Misch}$	ppm	Elementgehalt des Zumischpulvers
$EG_R$	ppm	Elementgehalt des Restpulvers
$EG_{rec}$	ppm	Elementgehalt des Recyclingpulvers
$G_{BR}$	-	Geometrie des umgebenden Bauraums
$G_{BT,S}$	-	Geometrie des Bauteils in der betrachteten Schicht
$G_{PB}$	-	Geometrie des Pulverbetts
$k_D$	€	Durchführungskosten
$k_B$	€	Kostenbilanz
$k_{Ent}$	€/kg	Entsorgungskosten
$k_P$	€/kg	Pulverpreis
$m_{AF}$	kg	Masse des Auffrischpulvers
$m_E$	kg/a	jährliche Materialersparnis
$m_{BR}$	kg	Pulvermasse im Bauraum

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$m_{ESUK}$	g	Masse des eingebrachten Spritzerunterkorns
$m_{ESUK,BR}$	g	Masse des eingebrachten Spritzerunterkorns im Bauraum
$m_{ESUK,PB}$	g	Masse des eingebrachten Spritzerunterkorns im Pulverbett
$m_{ESUK,S,BR}$	g	Masse des eingebrachten Spritzerunterkorns im umgebenden Bauraum pro Schicht
$m_{ESUK,S,PB}$	g	Masse des eingebrachten Spritzerunterkorns im Pulverbett pro Schicht
$m_{ges}$	g	Masse der gesamten Prozessspritzer
$m_{in}$	kg	Pulververbrauchsmasse pro Baujob
$m_{Misch}$	kg	Masse des Zumischpulvers
$m_{PB}$	kg	Pulvermasse im Pulverbett
$m_R$	kg	Restpulvermasse
$m_{rec}$	kg	Recyclingpulvermasse
$m_{SUK}$	g	Masse des Spritzerunterkorns
$M_{SUK}$	g	räumliches Verteilungsprofil des Spritzerunterkorns
$m_{ÜL}$	kg	Pulvermasse im Überlauf
$m_V$	kg	Pulververlustmasse
$N_B$	-	Anzahl der Blöcke
$N_S$	-	Anzahl der Spalten
$S$	-	Index für Schichten eines Baujobs
$U$	kV	Beschleunigungsspannung
$x, y, z$	mm	Koordinaten

---

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Laserstrahlschmelzen im produktionstechnischen Kontext

### 1.1.1 Potenziale des Laserstrahlschmelzens

Die Additive Fertigung befähigt Innovationen in Produkten und Prozessen. Die Technologie bietet das Potenzial zur Realisierung entscheidender Wettbewerbsvorteile (ACATECH 2016). Insbesondere das Laserstrahlschmelzen hat sich von einem Verfahren für den Prototypenbau rasant zu einer leistungsfähigen Fertigungstechnologie für die Kleinserienfertigung entwickelt und stellt aktuell das bedeutendste additive Fertigungsverfahren zur Herstellung metallischer Bauteile dar (WOHLERS 2018).

Die Technologie eignet sich für die Fertigung kleiner und komplexer Bauteile in geringen Stückzahlen. Die Charakteristika des Verfahrens bieten in ausgewählten Geschäftsmodellen entscheidende Vorteile im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren (LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2015, PILLER ET AL. 2018). Dabei spielen die funktionsorientierte Bauteiloptimierung durch gesteigerte Formgebungsfreiheit sowie die Beschleunigung von Geschäftsprozessen entscheidende Rollen (ZÄH & HAGEMANN 2006). Neben der schnellen Herstellung von Prototypen zählen die Anwendung von Leichtbau, Integralbauweise und Individualisierung sowie die Ersatzteilversorgung und Bauteilreparatur zu den Einsatzgebieten der Technologie.

In der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik und im Sondermaschinenbau findet das Verfahren bereits vielfach und erfolgreich Anwendung. Es ist davon auszugehen, dass die Bedeutung der Technologie in den kommenden Jahren weiterhin stark zunimmt. Im Bereich der metallbasierten additiven Fertigungsverfahren werden Wachstumsraten zwischen 10 % und 30 % pro Jahr prognostiziert (WOHLERS 2018, ACATECH 2016). Produktivere Anlagen, ein steigender Wettbewerb zwischen Anlagenherstellern und zunehmende Kompetenzen bei der Anwendung des Verfahrens in Unternehmen stellen Treiber für diese Entwicklung dar. Für die weitere Etablierung des Laserstrahlschmelzens als Produktionsverfahren in der Serienfertigung gibt es allerdings einige Herausforderungen zu überwinden.

### 1.1.2 Qualitätssicherung als zentrale Herausforderung

Herausforderungen in der Nutzung der Technologie resultieren aus fehlendem Erfahrungswissen im Umgang mit dem Laserstrahlschmelzen als Fertigungsverfahren (CAVIEZEL ET AL. 2017). Das Verfahren wird erst seit wenigen Jahren in ausgewählten Bereichen der Produktion eingesetzt. Bei Unsicherheiten im Kontext der Qualität werden häufig Lösungsvarianten mit geringem Risiko gewählt, um einen stabilen Prozess zu erreichen und Fehlerquellen möglichst zu vermeiden. Dabei werden oftmals höhere Kosten und eine geringere Produktivität in Kauf genommen.

Gerade im Bereich der Bauteilqualität sind viele Wirkzusammenhänge noch nicht vollständig erforscht. Da sich diese aus dem Zusammenspiel von insgesamt rund 150 Einflussfaktoren ergibt, kann sich ein umfassendes Verständnis erst langfristig entwickeln (REHME 2009, SEHRT 2010, GIBSON ET AL. 2015). Eine gleichbleibende Qualität ist dabei Prämisse für die wirtschaftliche Nutzung des Laserstrahlschmelzens als Fertigungstechnologie (CAVIEZEL ET AL. 2017). Dies gilt in besonderem Maße für die Luft- und Raumfahrt sowie die Medizintechnik als aktuell führende Branchen in der Nutzung der Technologie. Die Bauteilqualität resultiert allgemein aus dem Wechselwirkungsdreieck von Anlage, Werkstoff und den verwendeten Parametern (BAUER ET AL. 2016). Da die Konstanz der Qualität derzeit nicht sicher gewährleistet werden kann, wird in der industriellen Praxis ein hoher Aufwand bei der nachgelagerten Bauteilprüfung betrieben. Dies treibt die Bauteilkosten in die Höhe.

Im Hinblick auf die Qualität spielt das Pulver eine wesentliche Rolle. Für eine gleichbleibende Qualität in der Produktion werden Ausgangsmaterialien mit bekannten und reproduzierbaren Eigenschaften benötigt (SLOTWINSKI ET AL. 2014). Das Pulver muss gewisse Mindestanforderungen, wie beispielsweise eine ausreichende Fließfähigkeit für einen gleichmäßigen Schichtauftrag, erfüllen (BAUER ET AL. 2016). Konkrete Grenzwerte für Pulvereigenschaften sind aktuell allerdings nur wenig oder nur unzureichend etabliert. Eine Gefährdung für die Pulverqualität kann vom Pulverrecycling ausgehen (SEYDA 2018). Dies beschreibt die Aufbereitung und Wiederverwendung von nicht verfestigtem Pulver aus dem Laserstrahlschmelzprozess. Die damit einhergehende Alterung des Pulvers kann zu Änderungen der Pulvereigenschaften führen, die sich negativ auf die Bauteilqualität auswirken. Dabei spielen Effekte während des Laserstrahlschmelzens, aber auch während der Lagerung und Handhabung des Pulvers eine Rolle (BAUER ET AL. 2016). Es wird allgemein davon ausgegangen, dass sich das

---

Änderungsverhalten des Pulvers beim Pulverrecycling materialspezifisch verhält (NASA 2017B). Über die Mechanismen der Alterung und deren Wirkung auf die Bauteilqualität herrscht aktuell an vielen Stellen Unklarheit. Daher wird das Pulverrecycling in der industriellen Fertigung nur teilweise und in begrenztem Maße eingesetzt (DAWES ET AL. 2015, HANN 2016).

## 1.2 Motivation und Problemstellung

### 1.2.1 Bedeutung des Pulverrecyclings

Aus ökologischer Sicht bietet das Laserstrahlschmelzen eine potenziell hohe Materialeffizienz, die allerdings stark von der Wiederverwendung des nicht verfestigten Pulvermaterials abhängt (ARDILA ET AL. 2014). Bei der Herstellung eines Bauteils wird mit typischerweise bis zu 5 Prozent nur ein Bruchteil des eingesetzten Pulvers verwendet (HANN 2016). Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Materialverbleib nach der Fertigung einer Leichtbauwabenstruktur mittels LBM.

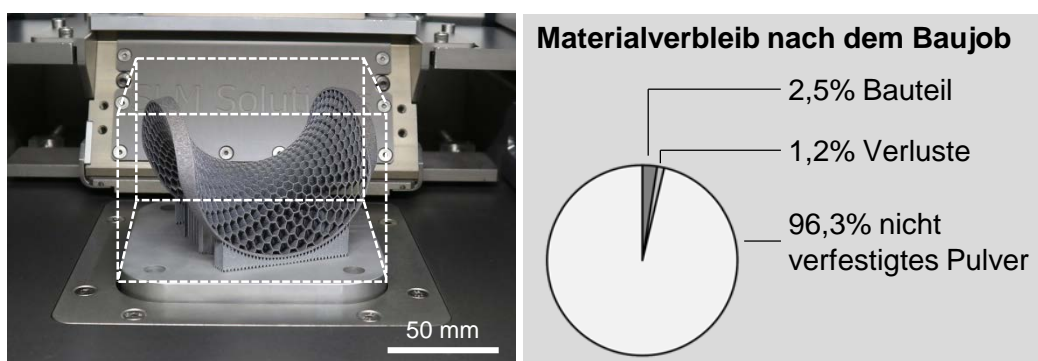


Abbildung 1: Verbleib des eingesetzten Pulvermaterials nach der Fertigung einer Leichtbauwabenstruktur

Es zeigt sich, dass über 95 % des eingesetzten Pulvers in diesem Fall nicht verfestigt werden. Der Umgang mit diesem Pulveranteil wirkt sich entscheidend auf die Materialkosten des Prozesses aus. Diese liegen, je nach Werkstoff und Anwendungsfall, zwischen 5 % und 46 % der Kosten des Laserstrahlschmelzprozesses (LINDEMANN ET AL. 2012). Wird Pulver nicht wiederverwendet, so dass es nach der ersten Verwendung voll abzuschreiben ist, fallen die zusätzlichen Materialkosten darüber hinaus um bis zu 75 % höher aus (BARCLIFT ET AL. 2016). Dabei sind etwaige Entsorgungskosten für nicht

verwendetes Pulver nicht berücksichtigt. Auch im Hinblick auf die Ressourcenbilanz des Prozesses kommt dem Pulver und dem Pulverrecycling eine bedeutende Rolle zu. Der Anteil des Pulvers am CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Herstellung eines Bauteils mittels Laserstrahlschmelzen liegt bei uneingeschränktem Pulverrecycling zwischen 17 % und 25 % (LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018B). Wird das Pulver nicht oder nur teilweise wiederverwendet, fällt der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck um 20 % bis 100 % höher aus. Das Pulverrecycling wirkt sich somit insgesamt signifikant auf die Ökonomie und Ökologie des Laserstrahlschmelzens aus.

### **1.2.2 Anwendung des Pulverrecyclings und Hemmnisse**

Bei der Wiederverwendung besteht ein Zielkonflikt zwischen Kosten und Qualität. Kein oder wenig Recycling bedeutet ein geringes Risiko für die Bauteilqualität, bedingt aber gleichzeitig hohe Kosten. Ein unbeschränktes Pulverrecycling kann theoretisch die Pulverqualität beeinträchtigen, ermöglicht aber niedrigere Materialkosten. Die Anwendung des Pulverrecyclings wird in der industriellen Praxis aktuell je nach Anwender sehr unterschiedlich gehandhabt (ARDILA ET AL. 2014). Das Spektrum reicht von einer ausschließlich einmaligen Verarbeitung des Pulvers bis hin zu einer nahezu unbegrenzten Wiederverwendung, bis das Pulver verbraucht ist.

Es liegen bislang nur vereinzelte unkonkrete und anwendungsspezifische normative Vorgaben oder Standards zum Pulverrecycling vor. Die Wiederverwendung des Pulvers wird zugelassen, wenn ein Nachweis erbracht wurde, wie sich dies auf die Materialeigenschaften auswirkt und wenn dies bei der Auslegung der zu fertigenden Bauteile berücksichtigt wird (NASA 2017A). Allerdings wurde das Recycling bisher noch nicht bei der Qualifizierung des Laserstrahlschmelzens als Fertigungsprozess berücksichtigt (ARDILA ET AL. 2014). Soll Pulverrecycling angewendet werden, gilt es das entsprechende Vorgehen genau zu spezifizieren und mögliche negative Einflüsse auf die Pulver- und Bauteilqualität zu berücksichtigen. Das Vorgehen beim Pulverrecycling muss dabei anwendungsspezifisch validiert werden (ARDILA ET AL. 2014).

### **1.3 Zielsetzung der Arbeit**

Insgesamt hat das Pulverrecycling eine große Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Laserstrahlschmelzens. Gleichzeitig wird der Ansatz aus Vorsicht und aufgrund einer unzureichenden Informationslage sowie nicht ausreichendem Know-how in



---

den Fertigungsbereichen nicht durchgängig angewendet. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass das Änderungsverhalten beim Recycling vom Werkstoff, der verwendeten Anlage und den gefertigten Bauteilen abhängt. Das Vorgehen beim Pulverrecycling ist somit im Einzelfall auf die spezifische Anwendung anzupassen.

Daher besteht das Ziel dieser Arbeit in der Entwicklung eines allgemeingültigen Vorgehens zur Qualifizierung des Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen. Dieser Ansatz kann Anwender der Technologie dazu befähigen, den höchstmöglichen Grad des Pulverrecyclings zu bestimmen, bei dem die geforderte Bauteilqualität nicht beeinträchtigt wird. Wird Pulverrecycling zu umfangreich angewendet, kann durch die Anwendung der Methode das Recycling so eingeschränkt werden, dass die Bauteilqualität stabilisiert und so die Ausschussquote reduziert wird.

Zum Erreichen dieses Ziels gilt es die auftretenden Änderungseffekte durch das Pulverrecycling zu identifizieren und zu bewerten. Weiterhin bedarf es der Modellierung kritischer Effekte beim Pulverrecycling, um deren Auftreten in Abhängigkeit von den relevanten Eingangsgrößen prognostizieren zu können. Darauf basierend kann eine Methode entwickelt werden, welche die Bewertung eines Vorgehens beim Pulverrecycling unter Berücksichtigung der geforderten Bauteilqualität ermöglicht.

Zur Erreichung dieses Ziels gilt es dabei die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- Wie ändert sich der Pulverzustand durch das Recycling?
- Wie relevant sind die Änderungen der Pulverqualität für die Bauteilqualität und somit die Qualitätssicherung?
- Wie kann die Änderung kritischer Pulvereigenschaften vorhergesagt werden?
- Wie kann das Vorgehen beim Pulverrecycling im Einzelfall bewertet und abgesichert werden?

Die Ergebnisse der Arbeit sollen die Unsicherheiten bei der Wiederverwendung des Pulvers minimieren und so den Einsatz eines qualitätsorientierten Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen in der industriellen Praxis befähigen.

## 1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Vorgehensweise und der damit verbundene Aufbau der Arbeit sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Zusammenhänge der einzelnen Kapitel werden nachfolgend beschrieben.



Abbildung 2: Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Im **Kapitel 2** wird das relevante Hintergrundwissen zum Laserstrahlschmelzen, den verwendeten Pulvermaterialien und der Prozesskette des Pulverrecyclings vermittelt. **Kapitel 3** beinhaltet eine strukturierte Zusammenfassung der relevanten Vorarbeiten im Bereich des Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen. Dabei wird zwischen Werkstoffgruppen unterschieden. Es wird anschließend genauer auf zwei ausgewählte Mechanismen eingegangen, die eine Änderung des Pulverzustands bedingen können. In **Kapitel 4** werden hypothetische Änderungseffekte systematisch hergeleitet und anschließend für drei ausgewählte Werkstoffe experimentell validiert. Auf dieser Basis kann deren Bedeutung für die Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen bewertet werden. Das Kapitel bildet damit eine Analyse der Wirkzusammenhänge bei der Pulveralterung durch Recycling. Das Ergebnis der Evaluierung der Kritikalität der Einzeleffekte fließt direkt in das darauffolgende Kapitel ein. In **Kapitel 5** wird ein Modell entwickelt, das die Änderungen des Pulverzustands durch das Pulverrecycling abbildet. Dabei gilt es auch die Mischvorgänge der betrachteten Pulvercharge und die beteiligten Pulverzustände zu berücksichtigen. Ein wichtiger Bestandteil ist dabei das Vorgehen zur Kalibrierung des Modells im spezifischen Anwendungsfall. Das

---

Modell wird experimentell plausibilisiert und validiert. Es bildet im darauffolgenden Kapitel einen wesentlichen Baustein des methodischen Vorgehens. **Kapitel 6** beinhaltet die Methode zur Qualifizierung eines qualitätsgesicherten Pulverrecyclings. Dabei wird das Modell aus Kapitel 5 eingebunden. Das Vorgehen wird anhand von Anwendungsbeispielen durchgeführt und anschließend evaluiert. In **Kapitel 7** werden die Ergebnisse aus der Arbeit zusammengefasst und kritisch diskutiert. Die Arbeit wird abschließend in den forschungstheoretischen Kontext eingeordnet. Anknüpfende Handlungsbedarfe werden im Ausblick abgeleitet.



---

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen für das Verständnis der Arbeit vermittelt. Es werden zentrale Begriffe definiert, das Verfahren Laserstrahlschmelzen beschrieben und dafür relevante Pulvereigenschaften erläutert. Weiterhin werden grundsätzliche Methoden zur Qualitätssicherung in der Produktion vorgestellt.

### 2.1 Definition zentraler Begriffe

Qualität: Laut DIN EN ISO 9000 ist Qualität allgemein definiert als der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt. Im produktionstechnischen Kontext wird der Begriff häufig für den Erfüllungsgrad technischer Anforderungen (z. B. werkstofftechnische Eigenschaften) genutzt, die an ein entstehendes Produkt gestellt werden (DIN 55350-11).

Modell: Laut VDI-RICHTLINIE 3633 BLATT 1 ist ein Modell definiert als eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild (VDI-RICHTLINIE 3633 BLATT 1).

Laserstrahlschmelzen (Englisch: *Laser Beam Melting, LBM*): Laut VDI-RICHTLINIE 3405 wird der Prozess definiert als „Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Aufschmelzen pulverförmigen Materials mittels Laser und Verschmelzen (Verschweißen) beim Erstarren.“

Pulverrecycling: Der Begriff beschreibt die Wiederaufbereitung von nicht verfestigtem Pulvermaterial und anschließende Verarbeitung im gleichen Verfahren. Da nachteilige Veränderungen von Pulvereigenschaften auftreten können, wird der Begriff des Recyclings verwendet.

Pulverqualität: Die Pulverqualität beschreibt den Zustand eines Pulvers, der anhand von Pulvereigenschaften bestimmt werden kann. Dabei wird zwischen primären und sekundären Eigenschaften unterschieden.

Änderungseffekt: Der Begriff wird definiert als eine aus physikalischen und/oder chemischen Einflüssen auf das Pulvermaterial bedingte Wirkung, die eine

Veränderung mindestens einer Pulvereigenschaft und somit des Zustands des Pulvers zur Folge hat.

Baujob: Ein Baujob stellt den Verarbeitungsschritt dar, in dem eine Pulvermenge mittels Laserstrahlschmelzen zu einem oder mehreren Bauteilen prozessiert wird. Ein Teil des Pulvers wird dabei nicht verfestigt. Als Nebenprodukt fallen Pulververluste an.

Recyclingpulver: Der Begriff wird definiert als die Pulvermenge, die in einem Baujob verarbeitet, dabei aber nicht verfestigt wird und mit dem Ziel der Wiederverwendung dem Pulverrecycling zugeführt werden kann.

Pulvercharge: Eine Menge an Pulvermaterial, die einen homogenen Zustand aufweist. Zwei Pulverchargen können durch Mischen zu einer neuen Pulvercharge vereint werden. Wird eine Pulvercharge getrennt und ein Teil geändert, so entsteht mindestens eine neue Pulvercharge.

Zyklus: Zeitlich diskreter Schritt, der einen oder mehrere Verarbeitungsprozesse (Baujobs) umfasst, bei denen eine Pulvercharge des gleichen Zustands verarbeitet wird. Der Zustand des Pulvers ändert sich durch die Verarbeitung. Neupulver befindet sich vor der ersten Verarbeitung im Zyklus 0.

Pulvermischkonzept: Der Begriff wird definiert als eine regelbasierte Vorgehensweise zum Vereinigen von Pulverchargen beim Pulverrecycling, um eine ausreichend große Ausgangsmenge für den nachfolgenden Baujob oder Zyklus zu bilden.

Pulverrecyclingstrategie (PRS): Operative Vorgehensweise bei der Wiederverwendung von Pulvermaterial, die durch eine konkrete Konfiguration von Gestaltungsmaßnahmen entlang der Prozesskette beschrieben wird.

## **2.2 Laserstrahlschmelzen**

Neben dem Verfahrensprinzip des Laserstrahlschmelzens werden im Folgenden die erforderlichen vor- und nachgelagerten Prozessschritte beschrieben. Weiterhin werden die Grundlagen des Pulvermanagements vorgestellt.

## 2.2.1 Verfahrensprinzip

Beim Laserstrahlschmelzen wird das Bauteil schichtweise durch lokales Aufschmelzen pulverförmigen Materials mittels eines Laserstrahls aufgebaut. Wie in Abbildung 3 dargestellt, wird in einem iterativen Prozess jeweils eine Pulverschicht aufgetragen und durch selektive Belichtung verfestigt. Anschließend wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt, um das Aufbringen der nächsten Pulverschicht zu ermöglichen.

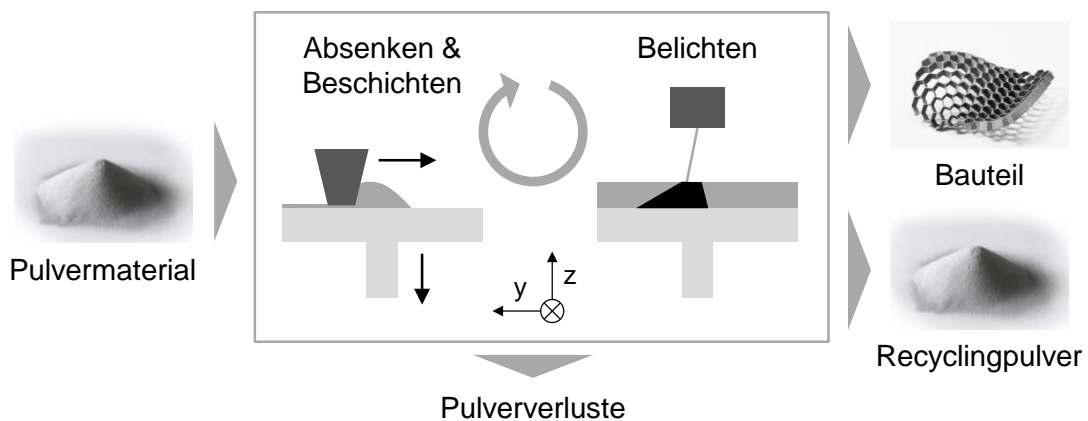


Abbildung 3: Funktionsweise des Laserstrahlschmelzens

Als Eingangsinformation für den Prozess wird eine digitale Baujobdatei genutzt, die Informationen über die zu verfestigende Geometrie sowie die zu verwendenden Prozessparameter enthält. Die erzeugte Struktur wird auf einer Bauplatte aufgebaut, die vor Beginn des Baujobs in der Anlage montiert wird. Diese wird je nach Werkstoff auf eine geeignete Ausgangstemperatur vorgeheizt, um Temperaturgradienten im Bauteil zu reduzieren. Eine Schutzgasatmosphäre während des Prozesses verringert die Oxidation der Schmelze. Der Restsauerstoffgehalt in der Baukammer beträgt typischerweise weniger als 0,2 %. Durch eine gleichmäßige Schutzgasströmung (SGS) über der Baufläche wird entstehender Schmauch aus dem Belichtungsbereich abtransportiert, um den Prozess nicht zu stören. Während des Prozesses entstehen unterschiedliche Materialverluste, beispielsweise im Schutzgasfilter oder durch Versintern von Pulverpartikeln (LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2016B). Am Ende des Bauprozesses kann die Bauplatte zusammen mit dem Bauteil bzw. den Bauteilen aus der Baukammer entnommen werden. Nicht verfestigtes Pulver wird in die Überlaufbehälter der Anlage befördert. (MEINERS 1999, ZÄH & HAGEMANN 2006, GIBSON ET AL. 2015, GEBHARDT 2016, VDI-RICHTLINIE 3405, YAN & YU 2015)

Beim Laserstrahlschmelzen kann ein breites Spektrum an metallischen Werkstoffen verarbeitet werden. Neben diversen Stählen, Leicht- und Edelmetallen, Kupfer- sowie Hochleistungslegierungen (Nickelbasislegierungen, Kobaltchromlegierungen) wurden bereits auch Hartmetalle erfolgreich verarbeitet. Der resultierende Werkstoff weist in der Regel eine relative Dichte von mindestens 99,5 % auf (VDI-RICHTLINIE 3405). Durch die hohen Abkühlraten während des Prozesses bildet sich ein feines und hartes Gefüge mit geringer Zähigkeit aus. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus bilden sich in der Regel nach dem Baujob anisotrope Werkstoffeigenschaften aus, die in den meisten Fällen durch eine nachgelagerte Wärmebehandlung homogenisiert werden können. Statische Werkstoffeigenschaften (z. B. quasistatische Zugfestigkeit, Härte) liegen in der Regel über dem Niveau des konventionellen Werkstoffs. Hinsichtlich des dynamischen Werkstoffverhaltens wurden unterschiedliche Verhaltensweisen des resultierenden Materials beobachtet, wobei die Festigkeitswerte teilweise unter den erreichbaren Werten bei konventionellen Herstellungsverfahren liegen. Um die durch den Laser eingebrachte Wärme aus dem Bauteil abzuleiten und thermomechanischen Verzug des Bauteils zu verhindern, werden für überhängende Bereiche Stützstrukturen am Bauteil vorgesehen. Für eine genauere Beschreibung kann der Aufbauprozess in die Schritte Belichten und Beschichten unterteilt werden. (GIBSON ET AL. 2015, GEBHARDT 2016, WOHLERS 2018)

### **2.2.1.1 Beschichten**

Für den Schichtauftrag wird eine vorgegebene Pulvermenge durch den Beschichter auf das Pulverbett aufgetragen (vgl. Abbildung 4). Durch das Absenken der Bauplatte entsteht ein Spalt zwischen Beschichtungs- und Bauebene, in dem das Pulver ablegt wird. Aus der Vorschubkraft des Beschichters und der Reibung zwischen dem aufzutragenden Pulver und dem Pulverbett bzw. Bauteil ergibt sich eine Schubspannung innerhalb der Pulverwalze vor und unter dem Beschichter. Aufgrund der Verfestigung des lose gepackten Pulverbetts zu einem dichten Vollmaterial beim Belichten fällt die effektive Schichtdicke deutlich größer aus als die nominale Schichtdicke, die durch das Verfahren der Bauplattform in z-Richtung vorgegeben wird (SPIERINGS & LEVY 2009). Überschüssiges Pulver wird in einen Überlaufbehälter hinter der Bauplattform geschoben.



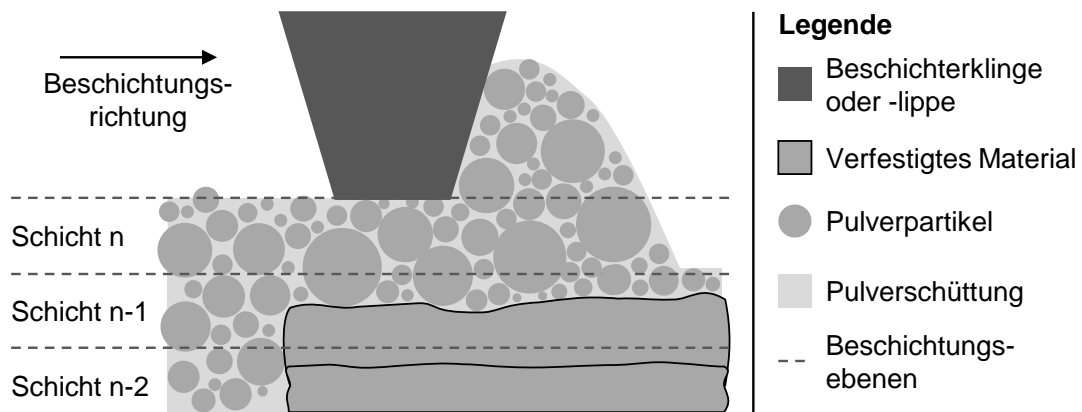


Abbildung 4: Pulverauftrag beim Beschichten und effektive Schichtdicke

Für die Bauweise des Beschichters werden unterschiedliche Konzepte (Lippe, Klinge, Bürste) sowie unterschiedliche Werkstoffe verwendet. Ein homogener Schichtauftrag ist eine Voraussetzung für ein gleichmäßig dichtes Bauteil. (GIBSON ET AL. 2015, GEBHARDT 2016, WOHLERS 2018)

### 2.2.1.2 Belichten

Der Laserstrahl wird mittels eines Galvanometerscanners in vorgegebenen Vektoren über den Bauteilquerschnitt im Pulverbett projiziert. Beim Auftreffen auf das Pulverbett wird er zum Teil von den Partikeln, dem Schmelzbad und entstehendem Plasma absorbiert und zum anderen Teil reflektiert. Die reflektierte Laserstrahlung wird wiederum zum Teil im umgebenden Pulverbett absorbiert. Der Absorptionsgrad des Lasers im Material wird dabei maßgeblich durch die Wellenlänge des Lasers bestimmt. Die Ausbildung des Schmelzbades in der obersten Bauteilschicht wird in Abbildung 5 veranschaulicht. Es bildet sich ein Schmelzbad aus, das sich mit dem Laserspot über den Bauteilquerschnitt bewegt. Im vorderen Bereich bildet sich ein sogenanntes *Keyhole* aus, in dem es aufgrund von Mehrfachreflexion zu einer besonders hohen Absorption der Laserenergie kommt. Innerhalb des Schmelzbades bildet sich aufgrund von starken lokalen Temperaturgradienten eine hochdynamische Strömung aus (vgl. Marangoni-Effekt). Aufgrund der hohen Beschleunigungswirkung innerhalb des Schmelzbades werden teilweise Tropfen flüssiger Schmelze aus dem Schmelzbad geschleudert. Diese werden als Prozessspritzer bezeichnet und lösen sich vor allem an der vorderen Wand des Schmelzbades ab. Aufgrund ihrer hohen Temperatur können sie mit der Restatmosphäre im Bauraum reagieren.

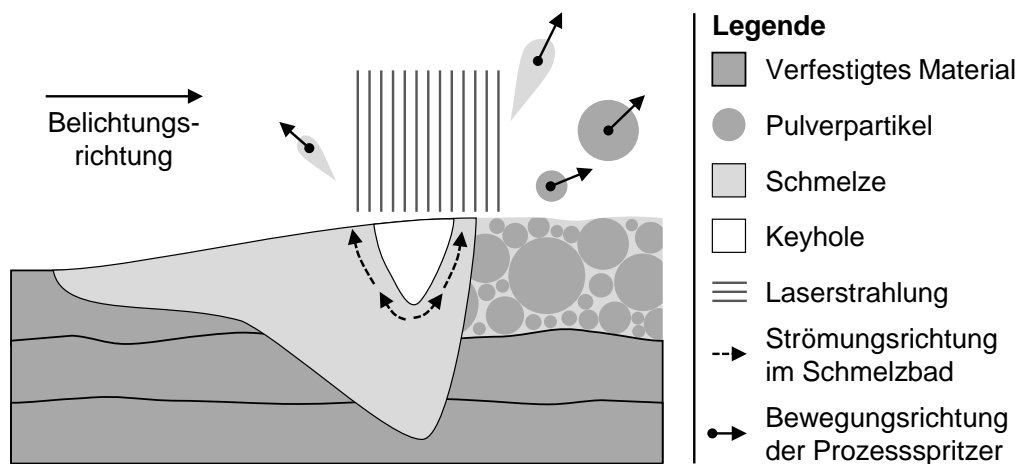


Abbildung 5: Bildung des dynamischen Schmelzbads bei der Belichtung

Durch den hierbei entstehenden Druckstoß können Pulverpartikel aus der direkten Umgebung des Schmelzbads weggeschleudert werden. Je nach Dynamik des Schmelzbades kann sich das *Keyhole* kurzzeitig verschließen, was zu einer Porenbildung führt. (GIBSON ET AL. 2015, GEBHARDT 2016, WOHLERS 2018)

### 2.2.1.3 Aufbau von LBM-Anlagen

Abbildung 6 zeigt den Aufbau und die Komponenten einer exemplarischen Laserstrahlschmelzanlage.

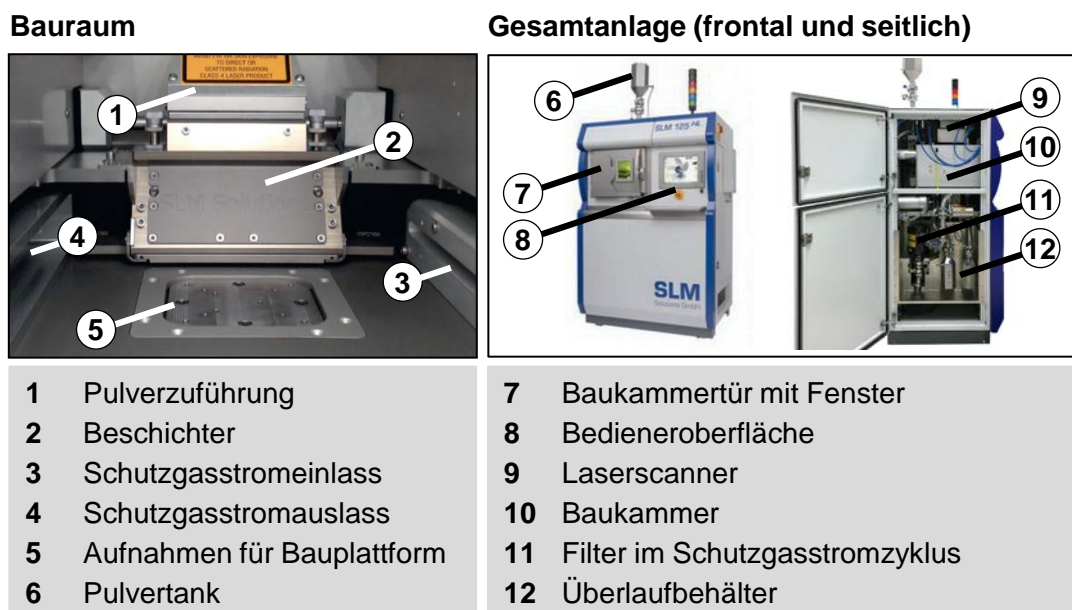


Abbildung 6: Aufbau der Laserstrahlschmelzanlage SLM125HL

Der Laser wird oberhalb der Bauplatte durch ein Schutzglas in den Bauraum geleitet. Die Schutzgasströmung verläuft in einem Umluftzyklus, der durch einen Filter von Aerosol bzw. mitgetragenen Partikeln bereinigt wird. Laserstrahlschmelzanlagen können im Hinblick auf den Materialfluss des Pulvers nach den in Tabelle 1 aufgeführten wesentlichen Bauweisen klassifiziert werden.

*Tabelle 1: Unterscheidungsmerkmale von industriellen LBM-Anlagen im Hinblick auf den Materialfluss des Pulvers*

Merkmale	Ausprägung
Bauplattengröße	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Small-size (maximal 125 mm x 215 mm)</li> <li>▪ Mid-size</li> <li>▪ Large-size (mindestens 400 mm x 400 mm)</li> </ul>
Bauplattenform	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rund</li> <li>▪ Rechteckig (teilweise mit abgerundeten Ecken)</li> </ul>
Pulverzuführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Befüllung des Pulvers von oben in den Beschichter</li> <li>▪ Zustellung des Pulvers von unten vor den Beschichter</li> </ul>
Pulvertank	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fest in der Anlage integriert</li> <li>▪ Abtrennbar von der Anlage und somit mobil</li> </ul>
Schutzgasströmung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unidirektional über die Baufläche</li> <li>▪ Sternförmig (von der Mitte oberhalb der Bauplatte ausgehend nach außen)</li> <li>▪ Mischformen</li> </ul>
Integration nachgelagerter Prozessschritte	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pulverabsaugung</li> <li>▪ Siebmodul für Recyclingpulver</li> <li>▪ Bauteilreinigung</li> </ul>

Bei den Bauplattenformen gilt es zu beachten, dass Bohrungen zur Befestigung in der Anlage teilweise durch die Platte gehen und so den nutzbaren Bereich einschränken. Bei den Pulverzuführkonzepten ergibt sich durch die beiden Varianten ein Unterschied bei der Verbrauchsreihenfolge des eingefüllten Pulvers. Bei der ersten Variante wird das zuerst eingefüllte Pulver zuerst verarbeitet (*First-in-First-out*). Bei der zweiten Variante kehrt sich die Reihenfolge um (*Last-in-First-out*). Bei der Vorheizung können durch die zweite Variante deutlich höhere Vorheiztemperaturen im Pulverbett erreicht werden. Die nachgelagerten Prozessschritte, die teilweise in die LBM-Anlagen integriert sind, werden im folgenden Unterabschnitt genauer erläutert.

## 2.2.2 Prozesskette

Bei der Prozesskette rund um das Laserstrahlschmelzen kann zwischen drei Phasen unterschieden werden, die sich durch den Start des Aufbauprozesses und die Entnahme des Bauteils aus dem Bauraum unterteilen (vgl. Abbildung 7) (VDI-RICHTLINIE 3405).

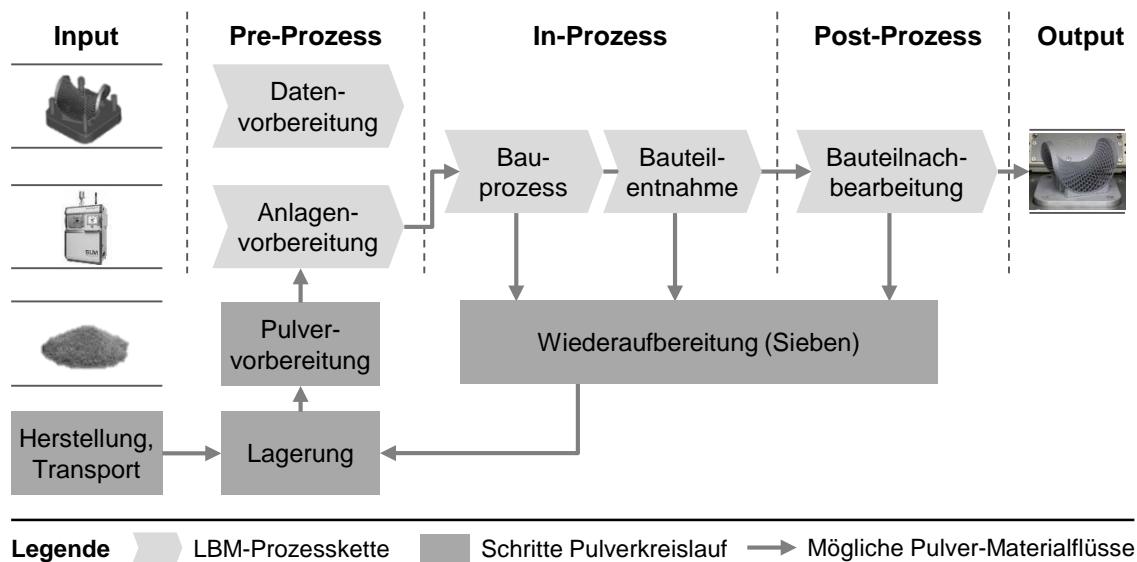


Abbildung 7: Prozesskette beim Laserstrahlschmelzen (ohne Pulververluste)

Im Rahmen des Pre-Prozesses werden die Bauteil- und Prozessdaten für die Verarbeitung vorbereitet. Parallel ist die Anlage zu rüsten. Dies beinhaltet den Einbau der Bauplatte, die Reinigung des Bauraumes sowie das Befüllen des Pulvertanks. Der In-Prozess umfasst das iterative Beschichten und Belichten sowie das anschließende Ausbauen der Bauplatte aus der Anlage. Nach dem Baujob befindet sich das Bauteil mit Pulver umgeben im abgesenkten Bauraum. Zur Entnahme wird die Bauplatte auf die Ausgangsstellung verfahren und nicht verfestigtes Pulver wird manuell mittels Schaufel, Spatel und/oder Pinseln in den oder die Überlaufbehälter befördert. Restpulver in der Baukammer, das nicht auf diese Weise entfernt werden kann, wird anschließend mit einem Nassabscheider oder Staubsauger entfernt. Der Post-Prozess umfasst alle nachfolgenden Fertigungsschritte, die das Bauteil bis zu seinem finalen Zustand durchläuft. Diese umfassen in der Regel das Entfernen von Pulverresten an und im Bauteil, das Abtrennen des Bauteils von der Bauplatte sowie das Entfernen von Stützstrukturen.

---

Die **Pulverprozesskette** beim Laserstrahlschmelzen ergibt sich aus den Materialflüssen des Pulvers. Nach der Herstellung und Verpackung des Pulvers wird dieses an den Produktionsstrandort **transportiert**. Ein wiederkehrender Schritt in der Pulverprozesskette stellt die **Lagerung** des Pulvers dar. Vor allem nach der Anlieferung und nach der Wiederaufbereitung werden die Pulver eingelagert. Bei der **Pulvervorbereitung** kann das Pulver gesiebt, homogenisiert, getrocknet und hinsichtlich der Pulverqualität geprüft werden. Das Pulver wird anschließend zum Rüsten der Anlage in den Pulvertank eingefüllt. Von dort aus wird es durch das Beschichten entweder in das Pulverbett oder in den Überlaufbehälter befördert. Im Pulverbett wird es entweder beim Belichten aufgeschmolzen oder es bleibt unverfestigt im Bauraum zurück. Weiterhin kann es bei der **Bauteilnachbearbeitung** dazu kommen, dass nicht verfestigtes Pulver wiedergewonnen werden kann (z. B. aus innenliegenden Bauteilbereichen). Soll Pulverrecycling angewendet werden, wird das Recyclingpulver **wiederaufbereitet**, um negative Einflüsse auf die Pulverqualität aus der Verarbeitung im LBM-Prozess zu revidieren. Dazu werden durch Siebung zu große Partikel (i. e. agglomerierte Partikel, Verschmutzungen, Prozessspritzer) aus dem Pulver entfernt. Durch das Sieben wird eine Pulvermenge allgemein in Über- und Unterkorn separiert. Es entstehen dabei weiterhin Verluste, die am Sieb zurückbleiben (i. e. Steckkorn und anhaftende Partikel). Das Recyclingpulver wird teilweise nach diesem Schritt mit anderen Pulverchargen vereint. Geschieht dies nicht schon beim Mischen selbst, sollte das Pulver anschließend homogenisiert werden. Auf den Schritt des Mischens wird im folgenden Unterabschnitt genauer eingegangen. (VDI-RICHTLINIE 3405, GIBSON ET AL. 2015, GEBHARDT 2016, JAHN ET AL. 2015)

### 2.2.3 Pulvermanagement

Bei der Verarbeitung einer Pulvermenge im LBM-Prozess wird ein Teil des Pulvers verfestigt oder geht als Verlust (Filter, Sieb etc.) verloren. Für einen darauffolgenden Baujob oder Zyklus muss daher teilweise Pulver hinzugefügt werden, um eine ausreichend große Pulvermenge zu erreichen. Für die Zusammenführung von Pulverchargen im Rahmen des Recyclings können allgemein **zwei Ansätze** unterschieden werden: Das Zumischen von Pulver des gleichen Zustands (**Kollektive Alterung**) und das Zumischen von Pulver eines besseren Zustands (**Kontinuierliches Auffrischen**). Die beiden grundsätzlichen Pulvermischkonzepte gehen aus Abbildung 8 hervor.

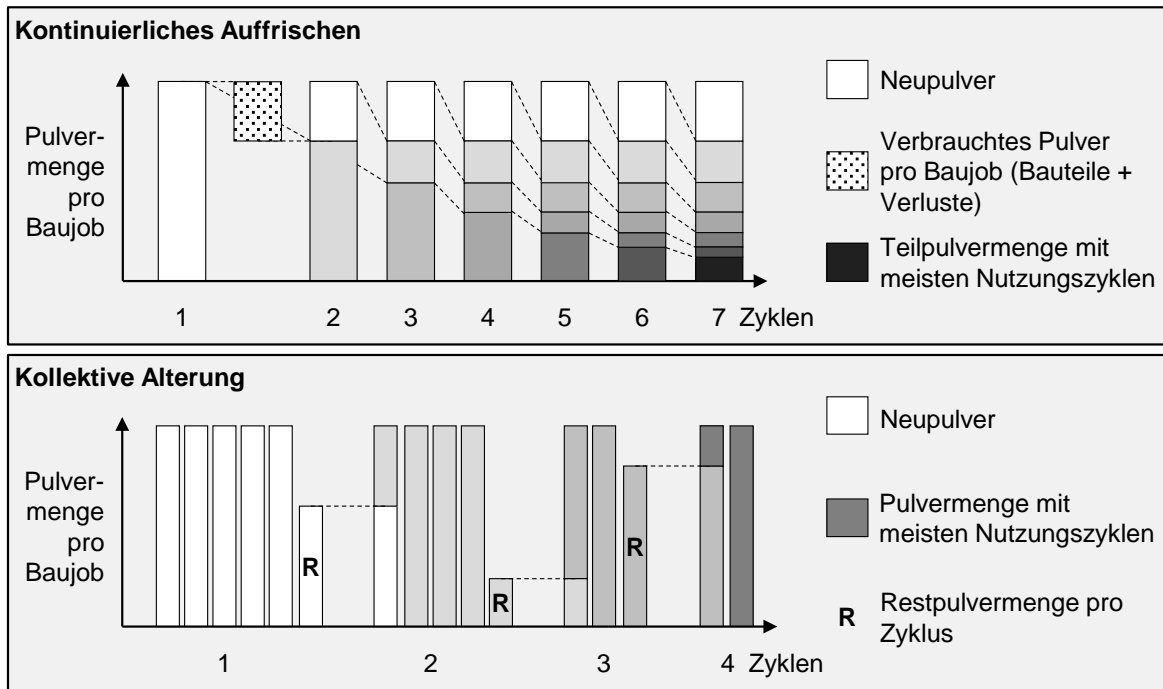


Abbildung 8: Schematischer Ablauf der Mischkonzepte, die Grautöne der Pulververteilungen repräsentieren den Pulverzustand zwischen neu (weiß) und alt (schwarz)

Bei der **kollektiven Alterung** wird nicht verfestigtes Pulver nach dem Prozess mit Pulverchargen des gleichen Zustands (z. B. gleiche Zyklenzahl) gemischt. Die Qualität ändert sich beim Mischen nicht. Ein Zyklus besteht in diesem Fall aus mehreren Baujobs. Das verfügbare Pulver wird auf mehrere Baujobs aufgeteilt, wobei in der Regel ein Rest (R) übrig bleibt, der dem nächsten Zyklus zugemischt werden kann. Der Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass vergleichsweise wenige Pulverzustände über den Lebenszyklus der Pulvercharge erzeugt werden. Daraus resultiert eine gute Rückverfolgbarkeit der verwendeten Pulverzustände, was in manchen Branchen eine Voraussetzung für die Zulassung darstellt. Nachteile liegen in der sukzessiven Änderung der Pulverqualität und der natürlich begrenzten Reichweite der Charge. Beim **kontinuierlichen Auffrischen** wird dem Recyclingpulver eine Charge mit höherer Qualität bzw. niedrigerem Zyklenalter zugemischt (z. B. Neupulver). Im Extremfall bedeutet dies nur einen Baujob pro Zyklus. Der Vorteil dieser Mischvariante besteht in der verlangsamten Alterung der Pulvercharge. Nachteilig wirkt, dass einzelne Pulverpartikel extrem lange im Pulver verbleiben und sich somit theoretisch stark verändern können. Weiterhin werden sehr viele Pulverzustände erzeugt, was die Rückverfolgbarkeit erschwert. Insgesamt können auch Mischformen der beiden Konzepte angewendet werden, die einzelne Vor- und Nachteile vereinen. Die VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2.3 empfiehlt für das

---

Pulverrecycling, dass verbrauchtes Pulver ersetzt bzw. aufgefrischt wird, was dem Konzept des kontinuierlichen Auffischens entspricht. Je nach Anwendung bzw. Anforderung ist dabei zu prüfen, ob das Pulver weiterhin der vorgegebenen Spezifikation entspricht. (VDI-RICHTLINIE 3633 BLATT 1, LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018B, VDI-RICHTLINIE 3405)

## **2.3 Eigenschaften von Metallpulvern für das Laserstrahlschmelzen**

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften beschrieben, die für Pulver beim Laserstrahlschmelzen von Bedeutung sind. Dabei wird auf den angestrebten Idealzustand der einzelnen Eigenschaften eingegangen. Pulver kann allgemein als eine Mischung aus Festkörpern, Gas und Flüssigkeit (Anlagerung von Umgebungsfeuchte) beschrieben werden (STIESS 2009). Eine Besonderheit von Pulverwerkstoffen für das Laserstrahlschmelzen besteht darin, dass diese ungefähr eine um den Faktor 10.000 größere spezifische Oberfläche im Vergleich zu konventionellem Vollmaterial aufweisen (HRYHA ET AL. 2017). Die verwendeten Pulver werden üblicherweise durch Verdüsung mittels Inertgas hergestellt, wobei vereinzelt auch andere Verfahren zur Pulverproduktion genutzt werden (DAWES ET AL. 2015). In der Normung werden für die meisten Pulvereigenschaften jeweils mehr als ein Messverfahren angegeben (VDI-RICHTLINIE 3405). Es gilt zu beachten, dass die Ergebnisse für eine Eigenschaft bei unterschiedlichen Messverfahren teilweise sehr unterschiedlich ausfallen.

Für die Pulverqualität beim Laserstrahlschmelzen sind laut ISO/ASTM DIS 52907 und VDI 3405 Blatt 2.3 ausgewählte Pulvereigenschaften entscheidend. Diese können gemäß Abbildung 9 in primäre und sekundäre Pulvereigenschaften unterschieden werden. Die sekundären Eigenschaften ergeben sich dabei aus dem Zusammenwirken der primären Eigenschaften. Grundsätzlich können sowohl primäre als auch sekundäre Eigenschaften messtechnisch charakterisiert werden. Da das Zusammenwirken der primären Eigenschaften ursächlich ist für die sekundären Eigenschaften, werden in dieser Arbeit die primären Eigenschaften als Beschreibungsmerkmal für die Pulverqualität verwendet. Diese können außerdem unabhängig voneinander gemessen werden. Im Gegensatz dazu werden in der industriellen Praxis häufig sekundäre Eigenschaften zur Eignungsbewertung von Pulvern genutzt, da diese näher am Prozessverhalten der Pulvers sind (SLOTWINSKI & GARBOCZI 2015). Ein Rückschluss auf die Ursache einer möglichen Änderung des Pulververhaltens ist in der Regel nicht möglich.

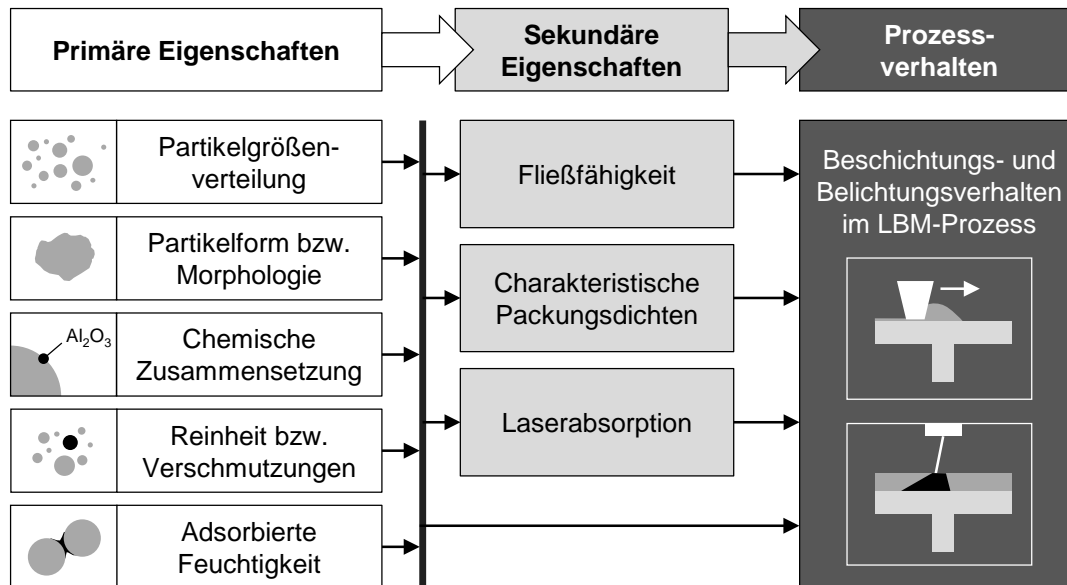


Abbildung 9: Einteilung der Pulvereigenschaften aus ISO/ASTM DIS 52907 und VDI 3405 Blatt 2.3 in primäre und sekundäre Eigenschaften

Es können Wirkungsketten entlang der Eigenschaftsebenen gebildet werden. Ausgehend von den primären Merkmalen beeinflussen die sekundären Eigenschaften das Verhalten des Pulvers im LBM-Prozess. Neben den in der Normung beschriebenen sekundären Eigenschaften können auch weitere ergänzt werden wie beispielsweise die Beschichtungsfähigkeit (MUÑIZ-LERMA ET AL. 2018). Die einzelnen primären Eigenschaften werden im Folgenden genauer beschrieben.

### 2.3.1 Primäre Pulvereigenschaften

In diesem Unterabschnitt werden die primären Pulvereigenschaften und deren geforderte Ausprägungen für das Laserstrahlschmelzen erläutert.

#### 2.3.1.1 Partikelgrößenverteilung

Die Darstellung von Partikelgrößenverteilungen (DIN ISO 9276-1) wird im Kontext der additiven Fertigung in der Regel über den Massen- oder Volumenanteil des Pulvers in vorgegebenen Größenklassen ausgedrückt. Dabei wird die Partikelgröße über den Äquivalenzdurchmesser der projizierten Fläche eines Partikels ausgedrückt. Die Volumenanteile der Klassen können als kumulativer Verlauf (Verteilungssumme  $Q_3$ ) oder Verteilungsdichte ( $q_3$ ) dargestellt werden (vgl. Abbildung 10).



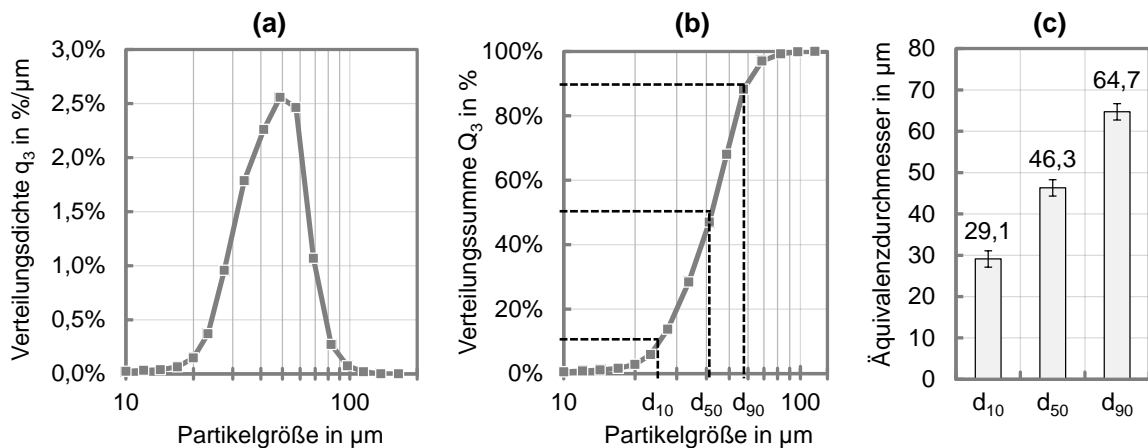


Abbildung 10: Darstellungsweisen der Partikelgrößenverteilung nach DIN ISO 9276-1: (a) Verteilungsdichte  $q_3$ ; (b) Verteilungssumme  $Q_3$  und (c) Darstellung über charakteristische Perzentile als Balkendiagramm inklusive Fehlerindikatoren

Bei der Verteilungsdichte (a) wird auf der Abszissenachse die Einheit  $\%/\mu\text{m}$  verwendet, da die Größenklassen unterschiedliche Breiten aufweisen. Für die Beschreibung der Verläufe können die charakteristischen Quantile der Verteilungskurven ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$  und  $d_{90}$ ) genutzt werden. Ein Quantil gibt dabei die Partikelgröße an, die eine Partikelmenge in die unteren  $c$  % und die oberen  $100-c$  % des Volumens bzw. der Masse des Pulvers teilt. Das Diagramm rechts (c) stellt die Verteilung komprimiert anhand der charakteristischen Perzentile dar. Aufgrund der guten Übersichtlichkeit und der Möglichkeit zur Darstellung eines Standardfehlers bietet sich diese reduzierte Darstellung für den Vergleich von mehreren Partikelgrößenverteilungen an.

Ein Zielzustand für die Partikelgrößenverteilung kann durch die Verhältnisse der charakteristischen Perzentile und der effektiven Schichtdicke beschrieben werden. Das Verhältnis der effektiven Schichtdicke zum  $d_{90}$ -Wert sollte laut SPIERINGS & LEVY 2009 im Bereich von ca. 1,5 liegen. Das Verhältnis von  $d_{90}$  zu  $d_{10}$  sollte ungefähr 5 betragen.

Beim Laserstrahlschmelzen werden in der Regel Pulver im Größenbereich von  $d_{10} = 10 \mu\text{m}$  bis  $d_{90} = 65 \mu\text{m}$  verwendet. Die Partikelgrößenverteilung bestimmt die charakteristischen Packungsdichten des Pulvers, wobei sich eine dichte Packung vorteilhaft für den LBM-Prozess auswirkt (GÜRTLER ET AL. 2014, LIU ET AL. 2015). Die Eigenschaft beeinflusst weiterhin die Fließfähigkeit des Pulvers, die für einen gleichmäßigen Schichtauftrag erforderlich ist.

### 2.3.1.2 Partikelform

Die Form (oder auch Morphologie) der Partikel eines Pulvers kann nach DIN ISO 9276-6 durch qualitative Klassen beschrieben werden. Dies erlaubt eine grobe und einfache Einteilung. Eine präzisere Beschreibung bieten quantitative Formfaktoren, die basierend auf geometrischen Merkmalen der projizierten Partikelkontur beschrieben werden können (z. B. Aspektverhältnis) (vgl. DIN ISO 9276-6). Bei LBM-Pulverwerkstoffen wurden teilweise makroskopische Poren ( $> 5$  Vol.-% des Partikels) im Inneren von Pulverpartikeln beobachtet. Idealerweise sind die Pulver für das Laserstrahlschmelzen möglichst sphärisch und frei von Hohlpartikeln bzw. makroskopischen Poren (OLAKANMI ET AL. 2015, SLOTWINSKI ET AL. 2014). Eine sphärische Partikelform begünstigt eine hohe Packungsdichte und eine gute Fließfähigkeit ohne interpartikuläres Verhaken (YANG & EVANS 2007).

### 2.3.1.3 Chemische Zusammensetzung

Im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung des Pulvermaterials beim Laserstrahlschmelzen wird zwischen Legierungselementen und den sonstigen beinhalteten Elementen unterschieden. Die Legierung des Werkstoffs wird analog zur konventionellen Fertigung als Massenanteile der beinhalteten metallischen Elemente ausgedrückt. Aufgrund der hohen spezifischen Oberflächen in Pulvermaterialien kommt nichtmetallischen Legierungselementen, die in Oberflächenschichten vorliegen, eine hohe Bedeutung zu. Diese sind in technischen Legierungen in der Regel nicht spezifiziert. Dabei handelt es sich vor allem um Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff (YAN & YU 2015). Diese Elemente werden im weiteren Verlauf als nichtmetallische Oberflächenelemente bezeichnet. Je nach Werkstoff können diese eine wichtige Rolle im Hinblick auf das mechanische Materialverhalten spielen. Bei vielen Leichtmetallen führt beispielsweise Sauerstoff zu einer Versprödung (YAN & YU 2015, LOUVIS ET AL. 2011, SEYDA ET AL. 2017). Die Konzentration dieser Elemente im Pulverwerkstoff hängt maßgeblich von der Pulverherstellung und der dabei verwendeten Atmosphäre ab. Eine ausreichend dicke Oxidschicht sorgt dafür, dass die Reaktivität des Pulvers gehemmt wird. Dieser gewünschte Effekt wird als Passivierung bezeichnet. Oxidschichten sind typischerweise zwischen 1 nm bis 20 nm dick (HRYHA ET AL. 2016). Gängige Werte für den Sauerstoffgehalt von Pulvermaterialien für das Laserstrahlschmelzen liegen zwischen 200 ppm und 2.000 ppm (ZÜHLKE ET AL. 2017). Die Werte liegen bei Leichtmetallen in der Regel höher als bei Stählen und Nickelbasislegierungen. Stickstoff liegt an der Oberfläche vermehrt in Form von Nitriden vor. Wasserstoff

kann sich im Atomgitter des Gefüges einbetten, aber auch in gebundener Form an der Oberfläche vorliegen.

Gerade der Sauerstoffgehalt beeinflusst die Viskosität der Schmelze, das Aufschmelzverhalten während des LBM-Prozesses und letztendlich auch die mechanischen Werkstoffeigenschaften der entstehenden Mikrostruktur (LOUVIS ET AL. 2011). Der Mechanismus des Aufbrechens der Oxidschichten des Pulvermaterials und des Einlagerns beim Aufschmelzprozess wird in Abbildung 11 schematisch aufgezeigt.

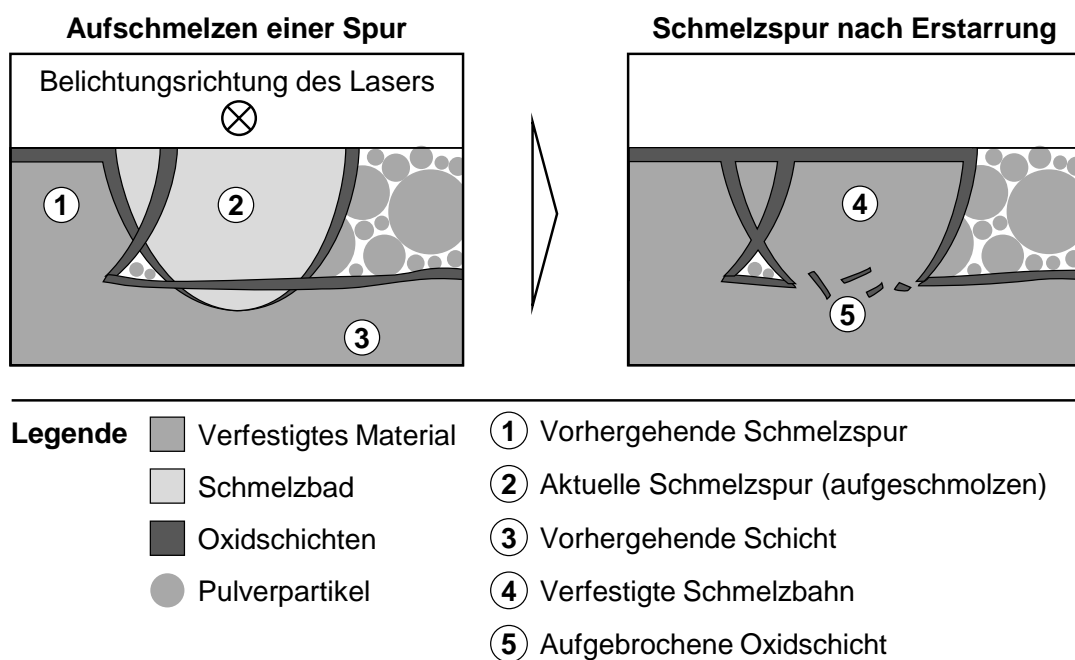


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Entstehung und räumlichen Verteilung von Oxidschichten während des Aufschmelzens beim Laserstrahlschmelzen (in Anlehnung an LOUVIS ET AL. 2011)

Werden Oxidschichten nicht oder nur teilweise aufgebrochen, werden diese ohne einen Übergang in die flüssige Phase im entstehenden Gefüge eingelagert (LOUVIS ET AL. 2011). Weiterhin wird das Benetzungsvermögen der Schmelze reduziert, was zur unvollständigen Anbindung zu benachbarten Schmelzbahnen und somit zur Bildung von Porosität führen kann (LI ET AL. 2010, SCHATT ET AL. 2007). Die Oxide lagern sich vornehmlich zwischen den einzelnen Schmelzbahnen an (vgl. Abbildung 11). Dies führt in vielen Werkstoffsystemen zu einer Versprödung. Das Verhalten der Oxidschichten beim Aufschmelzen hängt auch von den

Belichtungsparametern ab. Eine höhere Energieeinbringung begünstigt allgemein das Aufschmelzen der Schichten.

Die chemische Zusammensetzung sollte insgesamt der spezifizierten Legierung entsprechen und die Konzentration der nichtmetallischen Oberflächenelemente sollte möglichst gering sein. Bei einigen Werkstoffen (v. a. Leichtmetalle) ist eine passivierende Oxidschicht an der Oberfläche wünschenswert ist. Grenzwerte für nichtmetallische Legierungselemente werden teilweise in der Materialspezifikation vorgegeben, wie beispielsweise bei Ti6Al4V Grade 23 (max. 0,13 % Sauerstoff) oder Grade 5 (max. 0,2 % Sauerstoff).

### **2.3.1.4 Reinheit**

Eine weitere relevante Eigenschaft stellt die Reinheit des Pulvers dar. Bei der Pulverherstellung, der Handhabung sowie durch Materialwechsel auf einer LBM-Anlage können Fremdpartikel (z. B. Querkontaminationen) oder sonstige Verschmutzungen (z. B. Abrieb) in das Pulver eingebracht werden (LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2016A). Dies kann beim Aufschmelzen zu Defekten im Gefüge führen. Pulvermaterialien für das Laserstrahlschmelzen sollten daher allgemein frei von jeglichen Verschmutzungen sein.

### **2.3.1.5 Adsorbierte Feuchtigkeit**

Aufgrund der großen spezifischen Oberfläche des Pulvers bildet die adsorbierte Feuchtigkeit eine relevante primäre Eigenschaft des Pulvermaterials. Adsorptionsschichten bilden sich je nach umgebender Luftfeuchte aus. Luftfeuchtigkeit beschreibt die Menge an Wassermolekülen in der Luft. Es handelt sich dabei um gasförmiges Wasser. Die relative Luftfeuchtigkeit (r. F.) in % kennzeichnet das Verhältnis des vorliegenden Wasserdampfpartialdrucks zum Sättigungsdampfdruck (bzw. das Verhältnis von vorliegender absoluter Luftfeuchtigkeit zur Wasserdampfsättigungskonzentration). Metallpulver können allgemein als hygroskopisch bezeichnet werden, da sie bei relativen Luftfeuchtigkeitswerten unter 100 % Feuchtigkeit aus der Luft aufzunehmen und binden können. Das Aufnahmeverhalten von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft kann als Sorptionstherme dargestellt werden (vgl. Abbildung 12). Diese veranschaulicht die Änderung des Wassergehalts als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit bei gleicher Temperatur. (STAHL 1980)

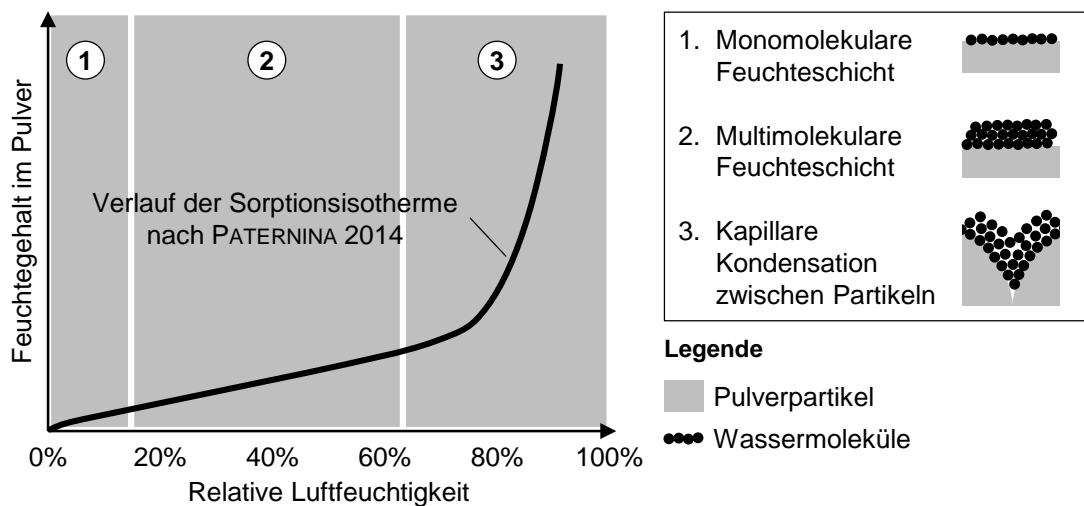


Abbildung 12: Sorptionstherme in Pulvermaterialien und Arten der Adsorption in Anlehnung an PATERNINA (2014) und NOKHODCHI (2005)

Es kann dabei zwischen drei Stufen der Adsorption unterschieden werden. Bei geringer Umgebungsfeuchte bildet sich eine monomolekulare Einzelschicht aus Wassermolekülen. Im mittleren Bereich entsteht eine multimolekulare Feuchtigkeitsschicht. Bei hoher Umgebungsfeuchte kommt es zur Bildung von Flüssigkeitsbrücken an den Kontaktpunkten der Partikel, die eine besonders starke Feuchtezunahme bedingt (NOKHODCHI 2005, SCHULZE 2014). Analog zur Aufnahme von Feuchtigkeit auf der Oberfläche (Adsorption) kann die Feuchte auch an die Umgebungsluft abgegeben werden (Desorption) (STAHL 1980).

Feuchtigkeit auf der Pulveroberfläche beeinträchtigt die Fließfähigkeit und behindert so einen gleichmäßigen Schichtauftrag (LOUVIS ET AL. 2011, YABLOKOVA ET AL. 2015, MARCU ET AL. 2012). Vor allem bei Aluminiumlegierungen kann die Feuchtigkeit beim Aufschmelzen zu einer erhöhten Wasserstoffporenbildung führen (WEINGARTEN ET AL. 2015, JAHN ET AL. 2015, LI ET AL. 2010). Die adsorbierte Feuchtigkeit liegt bei Metallpulvern für das Laserstrahlschmelzen in Umgebungsatmosphäre üblicherweise unter 0,1 Massenprozent bzw. 1.000 ppm (SARTIN ET AL. 2017). Der Idealzustand zeichnet sich allgemein durch eine möglichst geringe adsorbierte Feuchte aus.

### 2.3.2 Sekundäre Pulvereigenschaften

Die sekundären Eigenschaften des Pulvers resultieren aus dem Zusammenspiel der primären Eigenschaften. Sie beschreiben anwendungsrelevante Verhaltensweisen des Pulvermaterials.

Die **Fließfähigkeit** eines Pulvers ergibt sich aus dem Verhältnis der interpartikulären Haftkräfte (z. B. van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische Wechselwirkungen) zu den von außen auf das Pulver einwirkenden Kräften (SCHULZE 2014). Dabei gilt es hinsichtlich der Art der Belastungen auf das Pulver zu differenzieren (z. B. Schubspannung, freies Fließen, Kompression). Die Eigenschaft hängt im Wesentlichen von der Partikelgrößenverteilung, der Partikelform sowie der adsorbierten Feuchtigkeit ab. Eine hohe Fließfähigkeit ist im Besonderen für einen gleichmäßigen Schichtauftrag von Bedeutung (JACOB ET AL. 2017). Weiterführende Informationen zur Fließfähigkeit finden sich in SCHULZE 2014, SPIERINGS ET AL. 2015 und MARCU ET AL. 2012.

Die charakteristischen **Packungsdichten** eines Pulvermaterials bieten ein Maß für die Fähigkeit, unter verschiedenen Bedingungen ein gegebenes Volumen zu füllen. Dabei werden typischerweise drei Fälle unterschieden. Die Schüttdichte ergibt sich nach freiem Fließen des Pulvers in ein gegebenes Volumen. Wird diese Schüttung durch definierte Stöße verdichtet, ergibt sich daraus die Klopfdichte. Die Pulverbett-dichte zeigt sich nach dem Beschichten des Pulvers auf der Baufläche einer LBM-Anlage. Diese sekundäre Eigenschaft wird wesentlich durch die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform bestimmt. Bei allen charakteristischen Packungsdichten sind allgemein möglichst hohe Werte wünschenswert. Weiterführende Informationen zu den charakteristischen Packungsdichten finden sich in KARAPATIS ET AL. (1999) sowie SPIERINGS & LEVY (2009).

Die Interaktion zwischen Laserstrahl und Pulverbett wird maßgeblich bestimmt durch die **Laserabsorption**. Bei vielen LBM-Werkstoffen wird ein Großteil der Laserleistung durch das im Schmelzbad entstehende Plasma absorbiert und nicht über das Pulver selbst. Die Lasereinkopplung bestimmt wesentlich das Aufschmelzverhalten des Pulvers und ergibt sich aus Partikelgrößenverteilung, Partikelform und auch der Oberflächenchemie des Pulvers. Weiterführende Informationen zur Laserabsorption finden sich in BOLEY ET AL. (2015) und TRAPP ET AL. (2017).

---

Insgesamt wurden in diesem Abschnitt die grundlegenden Pulvereigenschaften erklärt. Diese bestimmen das Verhalten des Pulvermaterials im LBM-Prozess. Die entsprechenden Methoden zur Charakterisierung dieser Eigenschaften sind in der Normung (ISO/ASTM DIS 52907 und VDI 3405, Blatt 2.3) aufgeführt. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messmethoden werden im Anhang genauer beschrieben (vgl. Anhang A1).

## **2.4 Qualitätssicherung in der Produktion**

Die Sicherstellung der erforderlichen Qualität in der Produktion zählt zu den zentralen Aufgaben produzierender Unternehmen. Zur Erfüllung dieser Aufgaben können unterschiedliche Modelle und Methoden eingesetzt werden. Im Kontext des Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen sind im Besonderen die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und die statistische Prozessregelung von Bedeutung.

### **2.4.1 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)**

Eine bestehende Methode aus der Qualitätssicherung, die zur präventiven Identifikation, Bewertung und Vermeidung von Fehler genutzt werden kann, ist die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Betrachtungsgegenstand kann hierbei ein Produktdesign oder ein Prozess sein (BRÜGGEMANN & BREMER 2015, DIN EN 60812). Das Vorgehen für eine Prozess-FMEA umfasst drei Schritte:

1. Die Beschreibung des Prozesses
2. Die Analyse potentieller Fehler, Folgen und Ursachen
3. Die Bewertung von Fehlern und deren Folgen

Die FMEA zeichnet sich allgemein durch eine ganzheitliche Identifikation möglicher Fehler sowie durch ihren präventiven Charakter aus.

### **2.4.2 Statistische Prozesslenkung**

Die statistische Prozesslenkung (Englisch: *Statistical Process Control, SPC*) dient der Regelung inkonstanter Variablen in Fertigungsprozessen. Das Ziel von SPC besteht darin, laufende Prozesse hinsichtlich ihrer für die Produktqualität relevanten Parameter zu überwachen und möglich Störungen frühzeitig zu identifizieren. Als Werkzeug wird die Qualitätsregelkarte verwendet, auf der Warn- und

Eingriffsgrenzen des zu überwachenden Parameters sowie Stichprobenumfang und -abstand festgelegt werden. Eine beispielhafte Qualitätsregelkarte wird in Abbildung 13 dargestellt. (BRÜGGEMANN & BREMER 2015)

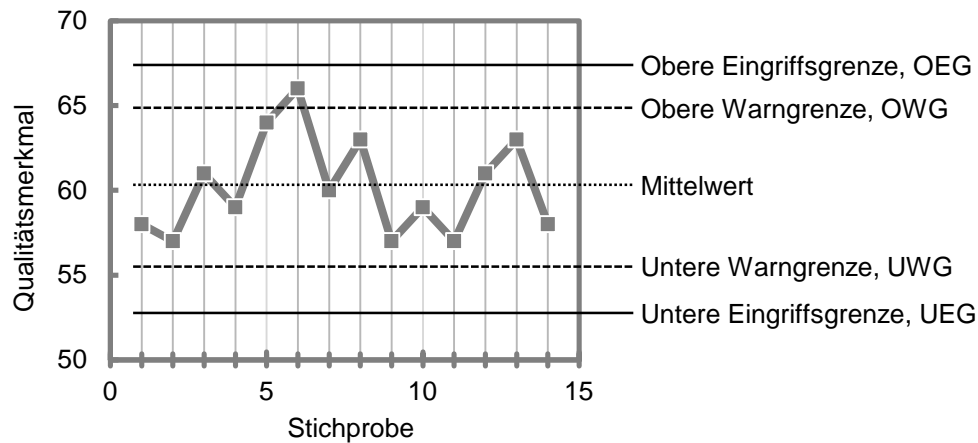


Abbildung 13: Umsetzung der statistischen Prozesslenkung anhand einer Qualitätsregelkarte

Die statistische Prozesslenkung kann dafür genutzt werden, einzelne Qualitätsmerkmale eines Prozesses systematisch zu überwachen und definierte Grenzen für ein Eingreifen festzulegen.

### 2.5 Fazit

In diesem Abschnitt wurden die Grundlagen für das Verständnis der folgenden Kapitel dargelegt. Eingangs wurden zentrale Begriffe dieser Arbeit definiert. Anschließend wurde das Laserstrahlschmelzen anhand des Verfahrensprinzips, der verwendeten Prozesskette sowie des Umgangs mit nicht verfestigtem Pulver beschrieben. Aufgrund der zentralen Rolle des Pulvermaterials wurden dessen relevante Merkmale erläutert. Es wird zwischen primären und sekundären Pulvereigenschaften unterschieden. Da die produktionstechnische Qualitätssicherung in der Arbeit eine Rolle spielt, wurden weiterhin bestehende Methoden vorgestellt, die in diesem Kontext eingesetzt werden können.



---

## **3 Stand der Forschung und Technik**

In diesem Kapitel wird der Erkenntnisstand im Bereich des Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen aufgezeigt. Es werden eingangs die bestehenden Vorarbeiten zum Einfluss des Pulverrecyclings auf Pulver- und Bauteilqualität zusammengefasst. Anschließend werden zwei zentrale Ursachen für die Änderung des Pulverzustands durch die Wiederverwendung genauer erläutert. Abschließend wird der aktuelle Stand der Umsetzung des Pulverrecyclings in der industriellen Praxis beschrieben.

### **3.1 Einfluss von Pulverrecycling auf die Pulver- und Bauteilqualität**

In diesem Abschnitt werden die Vorarbeiten zur Änderung von Pulvereigenschaften beim LBM durch Recycling und daraus resultierende Folgen für die Bauteilqualität dargelegt. Die Arbeiten können anhand von vier Werkstoffgruppen sortiert werden: Titan-, Aluminium- und Nickelbasislegierungen sowie Stähle. Für jede Gruppe werden im gleichen Schema die Erkenntnisse zum Änderungsverhalten durch Recycling anhand von Einflüssen auf die Pulver- und Bauteileigenschaften beschrieben. Es wird berücksichtigt, welche Eigenschaften unverändert bleiben. Es werden der betrachtete Werkstoff und die untersuchte Anzahl von Wiederverwendungszyklen angegeben.

#### **3.1.1 Titanlegierungen**

Die Erkenntnisse zur Wiederverwendung von Titanlegierungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Dabei wurde in allen Studien mit der Legierung Ti6Al4V gearbeitet.

SEYDA ET AL. (2012) untersuchen die Wiederverwendbarkeit von Ti6Al4V über 12 Zyklen. Sie beobachten, dass sich die Partikelgrößenverteilung durch das Recycling vergrößert. Dies wird damit erklärt, dass feine Partikel durch den Schutzgasstrom aus dem Bauraum herausgetragen werden und dass sich während des Siebens zwischen den Zyklen feine Partikel ( $< 20 \mu\text{m}$ ) als Aerosol aus dem Pulver entfernen. Für die Entstehung von groben Partikeln werden zwei Erklärungsansätze aufgestellt. Diese könnten auf der Bildung von Prozessspritzern während des Aufschmelzens und/oder dem thermisch induzierten Versintern von Partikeln zu Agglomeraten in bauteilnahen Bereichen beruhen. Gleichzeitig verbessern sich der

qualitative Eindruck der Fließfähigkeit sowie die Schüttdichte des Pulvers (ca. 9 % über 12 Zyklen). Im Hinblick auf die resultierenden Bauteileigenschaften nach 12 Zyklen zeigt sich eine minimale Steigerung der Bauteildichte, wobei die Anzahl an Poren sinkt und deren Größe zunimmt. Die Härte steigt um 3,6 % und die quasistatische Zugfestigkeit um 7 %. Gleichzeitig verschlechtert sich die Oberflächenrauheit gemessen in  $R_z$  um 34 %.

Tabelle 2: Änderung von Pulver- und Bauteileigenschaften durch das Pulverrecycling bei Titanlegierungen

	Pulvereigenschaften	Bauteileigenschaften
Keine Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sauerstoffgehalt [2,3]</li> <li>▪ Stickstoffgehalt [2]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quasistatische Zugfestigkeit [4]</li> </ul>
Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geringfügige Vergrößerung [1,2], leichter Rückgang Feinanteil [4]</li> <li>▪ Minimale Änderung Partikelform [4], Rauheit der Pulveroberfläche steigt [2]</li> <li>▪ Anstieg Sauerstoffgehalt [4]</li> <li>▪ Anstieg Stickstoffgehalt [4]</li> <li>▪ Höhere qualitative Fließfähigkeit [1]</li> <li>▪ Erhöhte Schüttdichte [1]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Höhere Dichte [1]</li> <li>▪ Höhere Härte [1]</li> <li>▪ Höhere quasistatische Zugfestigkeit [1]</li> <li>▪ Höhere Oberflächenrauheit [1]</li> </ul>
<p><b>Quellen:</b> [1] SEYDA ET AL. (2012), 6 und 12 Zyklen, Ti6Al4V; [2] O'LEARY ET AL. (2015), 1-5 Zyklen, Ti6Al4V; [3] SIMONELLI ET AL. (2015), 1 Zyklus, Ti6Al4V; [4] GRAINGER (2016), 20 und 38 Zyklen, Ti6Al4V</p>		

O'LEARY ET AL. (2015) stellen nach fünf Zyklen keine eindeutige Änderung des Sauerstoff- und Stickstoffgehalts im Pulver fest. Die Partikelgrößenverteilung zeigt hingegen eine Erhöhung der  $d_{10}$ - und  $d_{90}$ -Durchmesser um ca. 4  $\mu\text{m}$  bis 6  $\mu\text{m}$ . Dies entspricht einer geringfügigen Vergrößerung des Pulvers. Die qualitative Betrachtung der Partikelform mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigt, dass die Partikeloberfläche mit zunehmender Zyklenzahl eine rauere Beschaffenheit aufweist, so dass die Rundheit beeinträchtigt wird. SIMONELLI ET AL. (2015) finden bei der chemischen Analyse von Prozessspritzern aus der Verarbeitung von Ti6Al4V mittels LBM keinen Anstieg des Sauerstoffgehalts.

GRAINGER (2016) beobachtet bei der Verarbeitung von Ti6Al4V eine nur sehr geringe Änderung der Korngrößenverteilung (maximale Abweichung 1,3  $\mu\text{m}$ ). Auch die qualitativ mittels REM-Aufnahmen bestimmte Morphologie weicht nach 38 Zyklen nur geringfügig vom Ausgangszustand ab. Die Partikel bleiben

vornehmlich sphärisch mit nur wenigen leicht unförmigen Partikeln. Im Hinblick auf die nichtmetallischen Oberflächenelemente zeigt sich ein Trend zu einem steigenden Sauerstoff- und Stickstoffgehalt bei zunehmender Zyklenzahl (vgl. Abbildung 14).

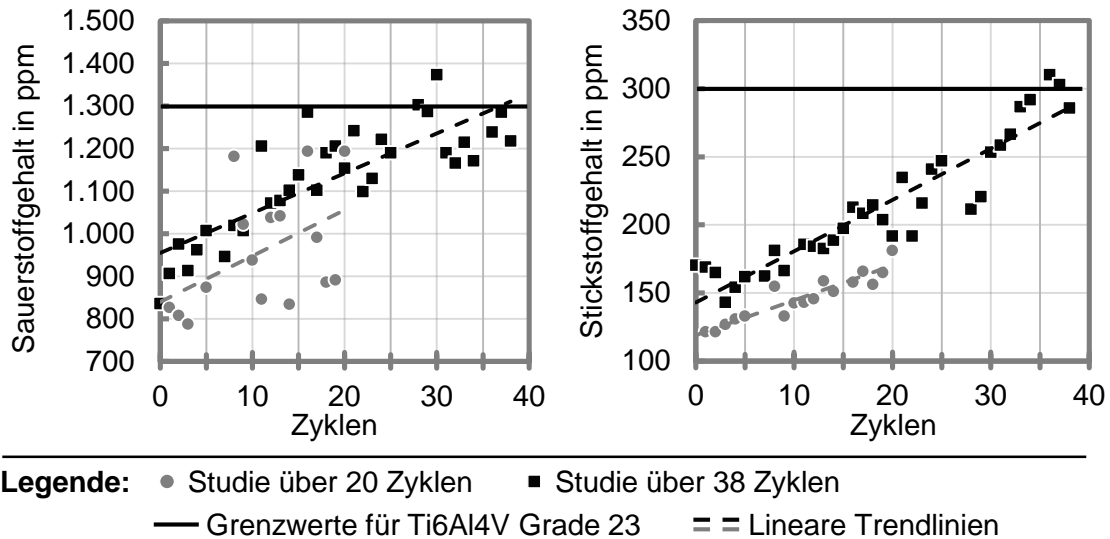


Abbildung 14: Zunahme des Sauerstoff- und Stickstoffgehalts in Ti6Al4V durch Pulverrecycling (Daten aus GRAINGER 2016)

Es wurden zwei Studien durchgeführt, bei denen das Pulvermaterial jeweils 20- und 38-mal wiederverwendet wird. Dabei steigen Sauerstoff- und Stickstoffgehalt kontinuierlich an, wobei sich vor allem beim Sauerstoff eine hohe Streuung der Messwerte zeigt. Nach 28 Zyklen liegt der Sauerstoffgehalt erstmalig über dem vorgegebenen Grenzwert nach ASTM F3001-14 Grade 23 von 1.300 ppm. Nach 36 Zyklen wird der entsprechende Grenzwert für Stickstoff erstmalig überschritten. Die quasistatische Zugfestigkeit bleibt dabei über 38 Zyklen unverändert.

Insgesamt zeigt sich mehrfach eine Vergrößerung des Pulvers durch das Recycling. Bei der Konzentration nichtmetallischer Legierungselemente wurde teilweise keine Änderung identifiziert, in anderen Anwendungsfällen hat sich dagegen ein kontinuierlicher Anstieg des Sauerstoff- und Stickstoffgehalts gezeigt. Einflüsse des Recyclings auf dynamische Bauteileigenschaften wurden für diesen Werkstoff nicht untersucht.

### 3.1.2 Aluminiumlegierungen

Die Ergebnisse der Arbeiten zur Wiederverwendung von Aluminiumlegierungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Dabei wurde durchweg die Legierung AlSi10Mg verwendet.

*Tabelle 3: Änderung von Pulver- und Bauteileigenschaften durch das Pulverrecycling bei Aluminiumlegierungen*

	Pulvereigenschaften	Bauteileigenschaften
Keine Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Partikelgrößenverteilung [2]</li> <li>▪ Partikelform [2]</li> <li>▪ Kristallstruktur und Gefüge [2]</li> </ul>	-
Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zunahme Sauerstoffgehalt (v. a. sauerstoffhaltige Anlagerung an Oberfläche von Prozessspritzern) [1,3]</li> <li>▪ Prozessspritzer deutlich gröber als Ausgangspulver [2,3]</li> </ul>	-

**Quellen:** [1] SIMONELLI ET AL. (2015), 1 Zyklus, AlSi10Mg; [2] ASGARI ET AL. (2017), 2 Zyklen, AlSi10Mg; [3] LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018A), 1 Zyklus, AlSi10Mg

SIMONELLI ET AL. (2015) beobachten, dass die bei der Verarbeitung von AlSi10Mg mittels LBM entstehenden Prozessspritzer stark oxidieren. ASGARI ET AL. (2017) finden bei der Analyse der Mikrostruktur der Pulverpartikel mittels Röntgenbeugung keine Änderungen nach einfacher Wiederverwendung von AlSi10Mg. Auch die geometrischen Merkmale des Pulvers bleiben erhalten. Nur bei Prozessspritzern zeigt sich im Unterschied zum Ausgangspulver ein extrem feines Gefüge. LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018A) zeigen, dass sich die Partikelgrößenverteilung der entstandenen Prozessspritzer stark mit derer des Neupulvers überlappt. Beim Sieben im Rahmen des Recyclings (Maschenweite 75 µm) werden dabei nur zwischen 43 % und 50 % der Spritzer entfernt.

Bei der Gruppe der Aluminiumlegierungen zeigt sich, dass eine Vergrößerung des Pulvers durch Einbringung der gröberen Prozessspritzer möglich, aber nach einem Zyklus nicht messbar ist. Die Auswirkungen des Pulverrecyclings auf die Bauteileigenschaften wurden nicht untersucht.

### 3.1.3 Nickelbasislegierungen

In der Tabelle 4 sind die Erkenntnisse zum Recycling von Nickelbasislegierungen zusammengefasst. Dabei wurden die Legierungen Inconel 718 (NiCr19NbMo, Werkstoffnummer 2.4668, kurz: IN718) und Hastelloy X (NiCr19Fe19Nb5Mo3, Werkstoffnummer 2.4665) verwendet.

Tabelle 4: Änderung von Pulver- und Bauteileigenschaften durch das Pulverrecycling bei Nickelbasislegierungen

	Pulvereigenschaften	Bauteileigenschaften
Keine Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Partikelgrößenverteilung [3]</li> <li>▪ Partikelform [1-3]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gefüge [1]</li> <li>▪ Kerbschlagbiegefestigkeit [1]</li> <li>▪ Quasistatische Zugfestigkeit [2]</li> <li>▪ Dynamische Festigkeit [3]</li> </ul>
Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vergrößerung [1,2]</li> <li>▪ Anstieg Sauerstoffgehalt [2,3], besonders durch oberflächliche Oxidzunahme [4]</li> <li>▪ Verdampfen von Silizium an Partikeloberfläche [4]</li> <li>▪ Erhöhung Packungsdichte [2]</li> <li>▪ Verbesserung Fließfähigkeit [2]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Leichter Trend zu geringerer Dichte [1]</li> <li>▪ Abnahme der Kerbschlagbiegefestigkeit [2]</li> </ul>
<p><b>Quellen:</b> [1] ARDILA ET AL. (2014), 14 Zyklen, IN718; [2] STRONDL ET AL. (2015), 2 Zyklen, IN718; [3] HANN (2016), 1-10 Zyklen, IN718; [4] SHVAB ET AL. (2016), 2 Zyklen, Hastelloy X</p>		

ARDILA ET AL. (2014) beobachten beim Werkstoff IN718 einen leichten Anstieg grober Partikelgrößen (zwischen 50 µm und 100 µm) über 14 Zyklen. Dies wird durch die Bildung von Agglomeraten erklärt. Hinsichtlich der Bauteilqualität zeigt sich eine leichte Tendenz hin zu einer geringeren Materialdichte nach 14 Zyklen. Die Kerbschlagbiegefestigkeit ändert sich allerdings nicht signifikant.

STRONDL ET AL. (2015) stellen bei IN718 eine Vergrößerung des Pulvers im Zuge der Wiederverwendung fest. Als mögliche Ursachen werden ein Wegtragen feiner Partikel aus der Oberfläche des Pulverbetts durch die Schutzgasströmung und eine Entfernung der groben Partikel beim Beschichtungs-vorgang durch Mitnahme mit

dem Beschichter aufgeführt. Das Aspektverhältnis der Partikelform sowie die qualitative Morphologie (anhand von REM-Aufnahmen) weisen keine Veränderung auf. Es zeigt sich ein drastischer Anstieg des Sauerstoffgehalts um 59 % im Vergleich zum Neupulver durch einfache Wiederverwendung. Weiterhin erhöht sich die Packungsdichte um 7 % und die Fließfähigkeit nimmt zu. Bei den Bauteileigenschaften zeigt sich keine merkliche Änderung der Zugfestigkeit, wohingegen die Kerbschlagbiegefestigkeit deutlich um 14 % abnimmt, was mit der Sauerstoffzunahme in Verbindung gebracht wird (Versprödung).

HANN (2016) untersucht die Wiederverwendung von IN718 über 10 Zyklen. Dabei ergibt sich keine messbare Änderung der Partikelgrößenverteilung oder der qualitativen Partikelform (REM-Aufnahmen). Der Sauerstoffgehalt des Pulvers steigt allerdings von 151 ppm auf 172 ppm an. Bei der dynamischen Bauteilfestigkeit im Bereich der Kurzzeitermüdung (*Low Cycle Fatigue*) ist kein Unterschied zwischen den Proben aus dem ersten und zehnten Zyklus erkennbar. Die erreichten Festigkeiten liegen alle über den vorgegebenen Werten für die Legierung im gegossenen Zustand.

SHVAB ET AL. (2016) beobachten für den Werkstoff Hastelloy X während des LBM-Prozesses gebildete Chrom- und Aluminiumoxide an der Partikeloberfläche. Gleichzeitig wurde eine Reduzierung des Siliziumgehalts in der Partikeloberfläche festgestellt, die vermutlich durch ein Verdampfen während des Prozesses bedingt ist.

Insgesamt zeigt sich für diese Werkstoffgruppe kein einheitliches Bild. Negative Einflüsse des Recyclings auf die mechanischen Bauteileigenschaften treten nur teilweise auf. Eine Vergrößerung des Pulvers und eine Zunahme des Sauerstoffgehalts werden mehrfach, aber nicht durchgehend beobachtet.

#### **3.1.4 Stähle**

Die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung zum Einfluss des Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen auf Stähle sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Dabei werden vor allem austenitische rostfreie Stähle (z. B. Werkstoffnummern 1.4404 und 1.4307) untersucht.

Tabelle 5: Änderung von Pulver- und Bauteileigenschaften durch das Pulverrecycling bei Stählen

	Pulvereigenschaften	Bauteileigenschaften
Keine Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Partikelform [2,6]</li> <li>▪ Legierung [2,6,7]</li> <li>▪ Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt [7]</li> <li>▪ Adsorbierte Feuchtigkeit [7]</li> <li>▪ Packungsdichte [7]</li> <li>▪ Fließfähigkeit [7]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Legierung [1,4]</li> <li>▪ Oberflächenrauheit [6]</li> <li>▪ Dichte [6,7]</li> <li>▪ Härte [6,7]</li> <li>▪ Zugfestigkeit [6,7]</li> <li>▪ Schmelzbadgeometrie [7]</li> </ul>
Änderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vergrößerung [2,5,7,8,9]</li> <li>▪ Grobe Prozessspritzer [3,4,9]</li> <li>▪ Erhöhter Feinanteil [1,6]</li> <li>▪ Unregelmäßige Partikelform durch Anhaftung von feinen Partikeln [1]</li> <li>▪ Anstieg Sauerstoffgehalt [5] bzw. sauerstoffreiche Anlagerungen auf der Partikeloberfläche [3,7,9]</li> <li>▪ Hoher Sauerstoffgehalt in Prozessspritzern [4,9]</li> <li>▪ Leichte Verringerung Wasserstoffgehalt [7]</li> <li>▪ Leichter Anstieg Kohlenstoffgehalt [6]</li> <li>▪ Verunreinigung [2,7]</li> <li>▪ Erhöhung Packungsdichten [6,8]</li> <li>▪ Steigerung Fließfähigkeit [6]</li> <li>▪ Teilweise Erhöhung der Laserabsorption [7]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verringerung Zugfestigkeit und Bruchdehnung, wenn Prozessspritzer nicht durch Sieben entfernt werden [4]</li> <li>▪ Anstieg der Varianz des Elastizitätsmoduls im quasistatischen Zugversuch [6,7]</li> </ul>

**Quellen:** [1] SKRYNECKI (2010), Verwendung über ca. 2 Jahre, 1.4404; [2] SLOTWINSKI ET AL. (2014), 8 Zyklen, 17-4SS; [3] SIMONELLI ET AL. (2015), 1 Zyklus, 1.4404; [4] LIU ET AL. (2015), 2-5 Zyklen, 1.4404; [5] NOVOTNAK & LHERBIER (2015), 10 Zyklen, Edelstahl (nicht genauer spezifiziert); [6] JACOB ET AL. (2017), 11 Zyklen, 17-4PH; [7] SARTIN ET AL. (2017), 12 Zyklen, 1.4404; [8] KRIEWALL ET AL. (2017), 3 Zyklen, 1.4307; [9] SUTTON ET AL. (2017), 1 Zyklus, 1.4307

SKRYNECKI (2010) findet bei Edelstahl 1.4404 nach einem Zyklus keine Änderung der Partikelgrößenverteilung oder -form. Ein Pulver, das unter produktionsnahen Bedingungen über zwei Jahre mehrfach wiederverwendet wurde, zeigt hingegen einen erhöhten Feinanteil sowie Agglomerate im Bereich von 300 µm bis 500 µm. Weiterhin sind zahlreiche feine Anhaftungen (< 10 µm) an Partikeln zu finden.

SLOTWINSKI ET AL. (2014) untersuchen die Veränderung der Morphologie durch die Wiederverwendung über acht Zyklen. Dabei erhöht sich das mittlere Aspektverhältnis der Partikelform. Diese wird dabei mit computertomographischen Aufnahmen in Kombination mit softwarebasierten Auswertungsalgorithmen ermittelt.

SIMONELLI ET AL. (2015) beobachten eine Sauerstoffaufnahme in den vergleichsweise groben Prozessspritzern beim austenitischen Stahl 1.4404. Auch LIU ET AL. (2015) untersuchen die Bildung von Prozessspritzern bei diesem Werkstoff und kommen zu gleichen Ergebnissen. Weiterhin zeigen sie, dass die quasistatische Zugfestigkeit drastisch absinkt, wenn die Prozessspritzer nicht mittels Sieben aus dem Pulver entfernt werden.

NOVOTNAK & LHERBIER (2015) beobachten bei der Wiederverwendung von Edelstahl über zehn Zyklen eine deutliche Zunahme des Sauerstoffgehalts, in diesem Fall von 320 ppm auf 840 ppm (Anstieg um 163 %).

JACOB ET AL. (2017) bestimmen nach dem Recycling des Edelstahls 17-4PH über 11 Zyklen eine geringfügige Verfeinerung der Partikelgrößenverteilung. Gleichzeitig verbessern sich Fließfähigkeit und Schüttdichte. Bei den Bauteileigenschaften stellen sich allerdings nur geringfügige Veränderungen ein. So bleiben die Oberflächenrauheit, die Bauteildichte und die chemische Zusammensetzung inklusive dem Stickstoffgehalt weitestgehend gleich. Allein beim Kohlenstoffgehalt ist ein leichter Anstieg über die Zyklen messbar. Die Autoren stellen weiterhin fest, dass das Verhalten der Proben im Zugversuch durch das Recycling beeinflusst werden kann, wobei der genaue Zusammenhang bei dieser Untersuchung unklar bleibt. Auffällig ist die steigende Variation des Elastizitätsmoduls.

SARTIN ET AL. (2017) stellen bei der Wiederverwendung von Edelstahl 1.4404 über 12 Zyklen eine Vergröberung des Pulvers fest. Es wurde keine relevante Änderung der Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente des gesiebten Pulvers beobachtet, es fällt allein ein Anstieg der Varianz des Sauerstoffgehalts auf. Beim Wasserstoff ist ein leichter und unregelmäßiger Abfall über die 12 Zyklen hinweg



---

festzustellen. Dies könnte mit einer sukzessiven Trocknung des Pulvers erklärt werden. Im Überkorn, das vor allem aus Prozessspritzern besteht, zeigt sich ein Anstieg der Sauerstoff- und Wasserstoffkonzentration. Die Feuchtigkeit im Pulver sowie die Fließfähigkeit und die Packungsdichte ändern sich nicht. In dieser Studie wird auch die Laserabsorption des Pulvers untersucht. Diese steigt bei der Wiederverwendung über 12 Zyklen an, wobei die Erhöhung beim Überkorn und bei Prozessspritzern besonders stark ausfällt. Auch die resultierende Bauteildichte, Härte, Schmelzbadgeometrie und Oberflächenrauheit bleiben nahezu unverändert. Die Zugfestigkeit verhält sich im Mittel konstant über die 12 Zyklen, allerdings steigt auch hier (ähnlich wie beim Sauerstoffgehalt) die Varianz.

KRIEWALL ET AL. (2017) beobachten bei der Wiederverwendung von Edelstahl 1.4307 über drei Zyklen eine Vergröberung des Pulvers. Sie zeigen anhand einer Versuchsreihe mit variierender Bauraumfüllung (zwischen 12,5 % und 75 %), dass diese das Ausmaß der Vergröberung des Recyclingpulvers pro Baujob beeinflusst. Größere Bauteilquerschnitte bewirken dabei eine stärkere Änderung. Aufgrund der zunehmenden Vergröberung durch die steigende Bauraumnutzung erhöhen sich die Pulververluste, die beim Sieben als Überkorn zurückbleiben.

SUTTON ET AL. (2017) untersuchen das Überkorn beim Sieben von wiederverwendetem Edelstahlpulver 1.4307. Es zeigen sich vereinzelt oxydische Ablagerungen auf der Oberfläche der Partikel.

Für die Gruppe der Stähle bestehen zum Teil detaillierte Vorarbeiten. Während sich die Vergröberung des Pulvers und die Zunahme des Sauerstoffgehalts bei vielen Untersuchungen gezeigt haben, fallen die Ergebnisse zum Einfluss des Pulverrecyclings auf die Zugfestigkeit unterschiedlich aus. Die Auswirkung der Wiederverwendung auf dynamische Bauteileigenschaften wurde nicht untersucht.

### **3.1.5 Fazit**

Eine Vielzahl von Studien hat sich mit der Thematik des Pulverrecyclings beschäftigt und den Einfluss der Wiederverwendung auf Pulver- und Bauteilqualität experimentell untersucht. Die in diesem Abschnitt zusammengefassten Erkenntnisse zeigen, dass durch den Laserstrahlschmelzprozess zentrale Pulvereigenschaften des Recyclingpulvers verändert werden können, was sich auf die Bauteilqualität auswirkt. Die Ergebnisse zeigen Unterschiede im Alterungsverhalten zwischen den betrachteten Werkstoffen. Während die Wirkung der Effekte und die resultierenden Zustandsänderungen vielfach beobachtet und gemessen wurden, konnte bisher

wenig Verständnis über die Treiber hinter den Änderungseffekten geschaffen werden.

Hinsichtlich der **Partikelgrößenverteilung** ergibt sich ein heterogenes Bild. Es zeigt sich überwiegend eine Vergrößerung der Pulver durch die Wiederverwendung. Die Intensität bzw. die Veränderung variiert jedoch stark je nach Anwendungsfall und Werkstoffgruppe. In seltenen Fällen wird auch keine Veränderung festgestellt. Bei der **Partikelform** wurden nur geringfügige Änderungen beobachtet, die durch thermische Einwirkungen beim Aufschmelzen begründet werden. Ein Anstieg der Konzentration von **nichtmetallischen Oberflächenelementen** im Pulver durch den LBM-Prozess wurde für mehrere Werkstoffe gezeigt. Dies gilt im Besonderen für den Sauerstoffgehalt, der sich im Laufe der Wiederverwendung teilweise mehr als verdoppelt. Besonders starke Änderungen wurden bei Prozessspritzern festgestellt.

Bei der Wirkung des Recyclings auf die **Bauteilqualität** zeigen sich heterogene Ergebnisse. So stellen sich Verbesserungen, aber auch deutliche Verschlechterungen der mechanischen Eigenschaften (z. B. Kerbschlagbiegefestigkeit, Zugfestigkeit) ein. Ein allgemeiner Zusammenhang ist nicht zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass teilweise wichtige Einfluss- und Störgrößen bei den Versuchen nicht mit erfasst oder angegeben wurden. Auswirkungen auf die dynamische Bauteilfestigkeit wurden lediglich in einer Studie betrachtet (HANN 2016). Insgesamt werden werkstoffübergreifend häufig eine Vergrößerung des Pulvers und ein Anstieg des Sauerstoffgehalts im Pulver beobachtet. Zu diesen Änderungen wurden teilweise auch Erklärungsansätze formuliert, auf die in Abschnitt 3.2 genauer eingegangen wird.

Aus **methodischer Sicht** fällt auf, dass in kaum einer Studie angegeben wird, welche Baujobs zur gezielten Alterung des Pulvers gefertigt werden. Dabei bestimmen Faktoren wie die Bauteilgeometrie, die Bauhöhe und die damit verbundene Bauraumauslastung die Einwirkungen auf das Pulver, beispielsweise durch Einbringung von Prozessspritzern. Dies erschwert die Interpretation und den Vergleich von Messergebnissen aus den unterschiedlichen Studien. Weiterhin werden vielfach nicht alle Pulvereigenschaften berücksichtigt. So wird die Feuchtigkeit im Pulver in der Regel nicht gemessen oder angegeben. Ergänzend werden daher die bestehenden Erkenntnisse zur Rolle der Feuchtigkeit in LBM-Pulvern in Abschnitt 3.3 erläutert.

---

## 3.2 Einbringung von Prozessspritzern

Die Verschiebung der Partikelgrößenverteilung und der Anstieg des Sauerstoffgehalts durch das Pulverrecycling werden mit der Bildung und Einbringung von Prozessspritzern in Verbindung gebracht. In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der Erkenntnisse zur deren Entstehung, Beschaffenheit und deren Wirkung auf die Bauteilqualität zusammengefasst.

### 3.2.1 Entstehung von Prozessspritzern

Das Phänomen der Bildung von Prozessspritzern ist vom Laserstrahlschweißen bekannt (KAPLAN & POWELL 2011, SCHWEIER 2016). Generell steigt mit zunehmender Laserenergie die Intensität der Spritzerbildung an. Der Effekt wurde spezifisch für das Laserstrahlschmelzen in mehreren Studien untersucht. Diese werden im Folgenden zusammengefasst.

LIU ET AL. (2015), DI WANG ET AL. (2017), TAHERI ANDANI ET AL. (2017), TAHERI ANDANI ET AL. (2018) und GUNENTHIRAM ET AL. (2018) untersuchen anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen die Bildung von Prozessspritzern beim LBM. Eine hohe eingebrachte Laserenergiedichte führt zu einer intensiven Spritzerbildung. BIDARE ET AL. (2018) zeigen anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, dass auch die Auswurfrichtung der Prozessspritzer durch die Laserparameter beeinflusst wird. Es wird von unterschiedlichen Typen von Prozessspritzern ausgegangen, die sich in ihrer Größe und Form unterscheiden. GUNENTHIRAM ET AL. (2018) beobachten, dass neben den Prozessspritzern auch Pulverpartikel aus dem Umfeld des Schmelzbades geschleudert bzw. aufgewirbelt werden. LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018A) bestimmen für die LBM-Verarbeitung von AlSi10Mg die Masse der entstehenden Prozessspritzer. Diese liegt im betrachteten Fall bei 16,7 % der verfestigten Bauteilmasse. Es werden drei Typen von Prozessspritzern unterschieden, die eng mit den Entstehungsmechanismen verbunden sind. Den Ablösevorgang der Prozessspritzer aus dem Schmelzbad beschreiben KHAIRALLAH ET AL. (2016) und LY ET AL. (2017) anhand von Fluidsimulationen und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Schmelzbads. Der Entstehungsvorgang ist in Abbildung 15 veranschaulicht. Demnach entstehen die Prozessspritzer durch das explosionsartige Ausströmen von Metaldampf aus der Mitte des Schmelzbads. Diese lokale Gasströmung beschleunigt die Schmelze an der Oberfläche des *Keyholes* (v.a. vordere Wand) so stark, dass diese tropfenweise mitgerissen und herausgeschleudert wird.

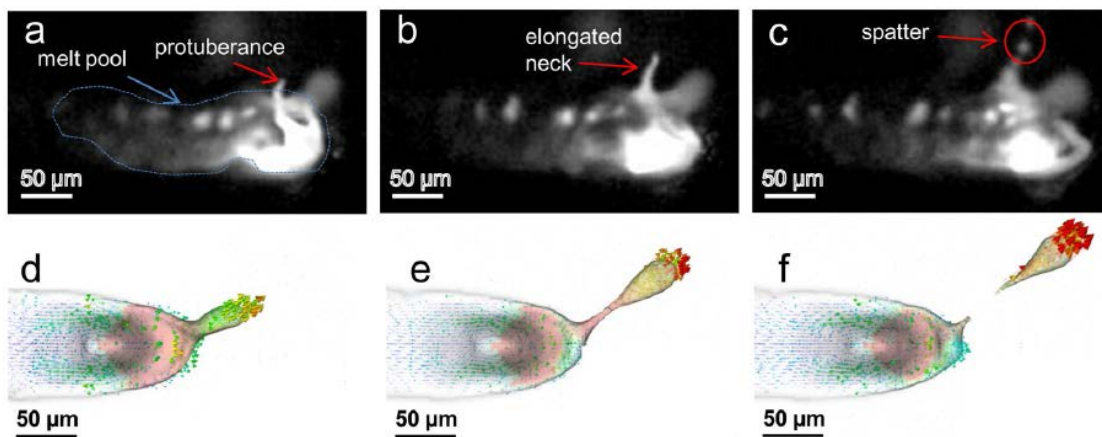


Abbildung 15: Detailansicht der Ablösung eines Prozessspritzers aus dem Schmelzbad, Vergleich von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (a-c) und Schmelzbadsimulation (d-f) (aus LY ET AL. 2017)

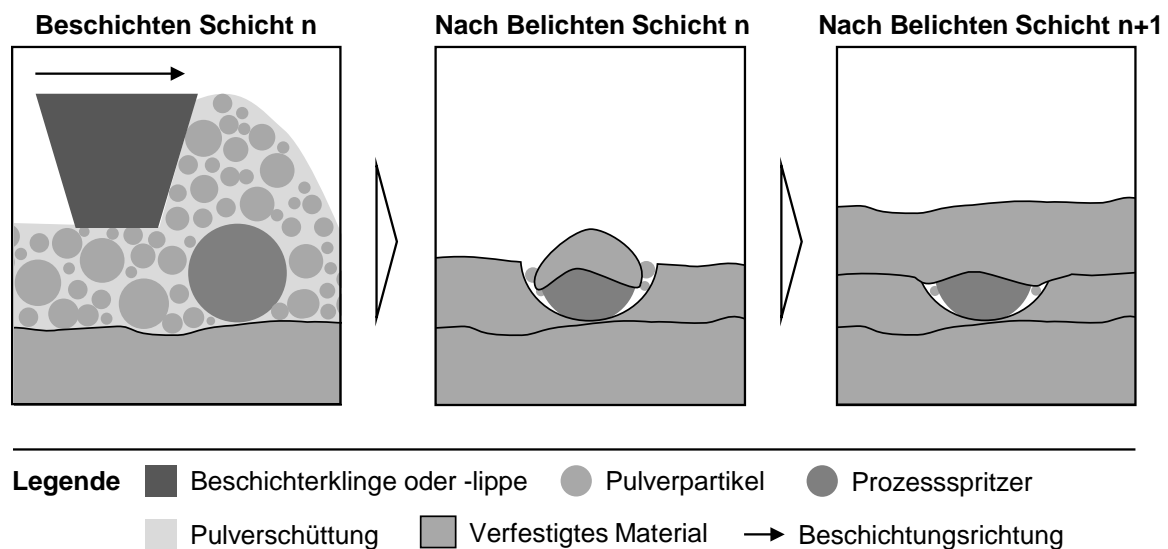
ANWAR & PHAM (2018) untersuchen über die Entstehung hinaus die räumliche Verteilung von Prozessspritzern im Bauraum und quantifizieren diese mittels softwarebasierter Analyse von Bildaufnahmen des Pulverbetts. Sie zeigen, dass die Spritzer durch die Schutzgasströmung mitgetragen werden und dass diese am stärksten im Bereich direkt neben dem Entstehungsort eingebracht werden. ESCHNER ET AL. 2019 stellen einen Ansatz zur kamerabasierten Erfassung der Flugbahn von einzelnen Prozessspritzern vor, der eine Analyse der räumlichen Verteilung innerhalb der Prozesskammer ermöglicht. In SCHNIEDENHARN & SCHLEIFENBAUM 2018 und SCHNIEDENHARN ET AL. 2018 wird das Strömungsprofil oberhalb der Baufläche durch lokale Geschwindigkeitsmessungen untersucht. Dabei wird die zentrale Bedeutung der Schutzgasströmung für den Abtransport von Prozessnebenprodukten unterstrichen. REPOSSINI ET AL. (2017) untersuchen die Möglichkeit, durch In-Prozess-Überwachung der Spritzerbildung mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eine Aussage über die Güte und mögliche Unregelmäßigkeiten des LBM-Prozesses zu treffen.

#### 3.2.2 Bedeutung für die Bauteilqualität

Die Vorarbeiten in Abschnitt 3.1 zeigen, dass die Prozessspritzer bei den betrachteten Werkstoffen im Vergleich zum Neupulver gröber ausfallen und eine erhöhte Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente enthalten. Dieser Effekt kann mit der Reaktion der noch flüssigen und entsprechend heißen Schmelze mit der Restatmosphäre im Bauraum begründet werden. Der Erkenntnisstand zur

Bedeutung von eingebrachten Spritzern für die Bauteilqualität wird im Folgenden erläutert.

LIU ET AL. (2015) zeigen für den austenitischen Stahl 1.4404 eine deutliche negative Wirkung von Spritzereinbringung auf die quasistatische Zugfestigkeit (Verringerung um 25 %), wenn die Spritzer nicht durch Sieben nach dem Prozess entfernt werden. LADEWIG ET AL. (2016) und DI WANG ET AL. (2017) beobachten bei der Einbringung von Prozessspritzern die Bildung von charakteristischen Defekten in der Mikrostruktur, die sie mit der Verringerung der Bauteilfestigkeit in Verbindung bringen. TAHERI ANDANI ET AL. (2017) stellen eine Verschlechterung der quasistatischen Zugfestigkeit bei LBM-Probe aus AlSi10Mg durch eine erhöhte Menge eingebrachter Spritzer fest. Aus den Quellen geht ein gemeinsamer Erklärungsansatz für die durch Prozessspritzer eingebrachten Defekte hervor. Dieser wird in Abbildung 16 veranschaulicht.



*Abbildung 16: Entstehungsmechanismus von Defekten durch eingebrachte Prozessspritzer (in Anlehnung an LIU ET AL. 2015)*

Aufgrund der vorangegangenen Siebung des verwendeten Pulvers kann davon ausgegangen werden, dass alle Partikel kleiner sind als die effektive Schichtdicke und somit das Beschichten nicht beeinträchtigt wird. Bei großen Prozessspritzern kann es allerdings während des Belichtens zu unvollständigem Aufschmelzen dieser Partikel kommen. Eine Oxidation der Spritzer und die damit verbundene thermisch stabile Oxidschicht hemmen zusätzlich das Aufschmelzen. Dadurch bildet sich ein Defekt in der Mikrostruktur aus. Die entstehenden Poren können sich auf die

statische und dynamische Bauteilfestigkeit auswirken, da unregelmäßig geformte Poren als Spannungsspitzen im Werkstoff wirken und als Ausgangspunkte für die Rissbildung dienen (YADOLLAHI ET AL. 2017). TAHERI ANDANI ET AL. (2018) zeigen gleichzeitig für eingebrachte Prozessspritzer bei AlSi10Mg, dass eine Erhöhung der Laserenergiedichte auf ein ausreichend hohes Niveau ein komplettes Aufschmelzen der eingebrachten Spritzer ermöglicht. Allerdings bedingt eine höhere Energiedichte wiederum eine stärkere Spritzerbildung.

Insgesamt wurde die Entstehung von Prozessspritzern vielfach beobachtet und charakterisiert. Der mikroskopische Entstehungsmechanismus konnte anhand von Schmelzbadsimulationen erklärt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Einbringung von Prozessspritzern aufgrund von unvollständigem Aufschmelzen zu Defekten im Bauteil führen kann. Teilweise wurde dies durch eine Anpassung der Prozessparameter kompensiert. Die räumliche Verteilung der Prozessspritzer im Bauraum und deren Einbringung in das Pulverbett und damit das Recyclingpulver wurden bisher kaum untersucht. Weiterhin herrscht Unklarheit über den Einfluss eingebrachter Spritzer auf die resultierenden dynamischen Bauteileigenschaften.

### **3.3 Interaktion von Umgebungsfeuchte und Pulvermaterial**

Die Handhabung und die Lagerung des Pulvers stellen obligatorische Bestandteile der Prozesskette beim Pulverrecycling dar. Bei diesen Schritten können äußere Einflüsse durch die Umgebungsatmosphäre auf das Pulvermaterial wirken. Bestehende Forschungsergebnisse zu diesem Vorgang werden in den folgenden beiden Unterabschnitten zusammengefasst. Dabei wird zwischen der Sorption von Feuchtigkeit und chemischen Reaktionen mit dieser Feuchte unterschieden.

#### **3.3.1 Adsorption und Desorption von Feuchtigkeit**

SEYDA ET AL. (2014) untersuchen, wie die Aufnahme von Feuchtigkeit das Verhalten von Ti6Al4V-Pulver beeinflusst. Sie setzen das Pulver schwankenden und extremen Umgebungsbedingungen aus (20 Tage, Temperaturen zwischen 20 °C und 100 °C, Luftfeuchtigkeit zwischen 10 % und 90 %). Nach der Auslagerung zeigt sich eine Vergrößerung des mittleren Partikeldurchmessers von 37,4 µm auf 52,1 µm. Dieser Effekt wird mit der Ausbildung von Wasserstoffbrücken zwischen Partikeln begründet, die zu einer Bildung von Agglomeraten führen, die bei der Messung der Partikelgrößenverteilung nicht aufgelöst werden.

---

Für die Desorption von Feuchte, die einer Trocknung des Pulvers entspricht, wurden vereinzelte Ansätze untersucht. CORDOVA ET AL. (2017) wenden zwei Trocknungsmethoden (Vakuum bei 85 °C für 6 Stunden; Umgebungsluft bei 150 °C für 20 Minuten) auf Pulver aus vier unterschiedlichen Werkstoffen an. Die Pulver aus Ti6Al4V und IN718 scheinen von Beginn an wenig Feuchtigkeit adsorbiert zu haben, so dass sich kein Effekt einstellt. Im Gegensatz dazu zeigt sich eine hohe Massendifferenz durch Trocknung bei der AlMgSc-Legierung Scalmalloy. Beim Werkstoff AlSi10Mg zeigt sich durch beide Trocknungsmethoden keine Änderung. Vereinzelt wurde ein positiver Einfluss der Trocknung auf die Beschichtungsqualität und Porosität beobachtet. So konnten MARCU ET AL. (2012) und YABLOKOVA ET AL. (2015) zeigen, dass die Trocknung von TiNb-Pulver signifikant die Fließfähigkeit und die Beschichtungsqualität erhöht. Das Pulver wurde dazu eine Stunde bei 600 °C in Umgebungs- und Argonatmosphäre ausgelagert. LI ET AL. (2010) zeigen, dass die Entfeuchtung von AlSi12-Pulver über eine Stunde bei 100 °C zu einer Verringerung der Bauteilporosität beim Laserstrahlschmelzen von 3 % auf 1 % führt. WEINGARTEN ET AL. 2015 beobachten für ein AlSi10Mg-Pulver, dass eine Trocknung des Pulvermaterials im Ofen bei 90 °C und 200 °C in Umgebungsluft direkt vor der Verarbeitung die Porosität um bis zu 50 % reduziert.

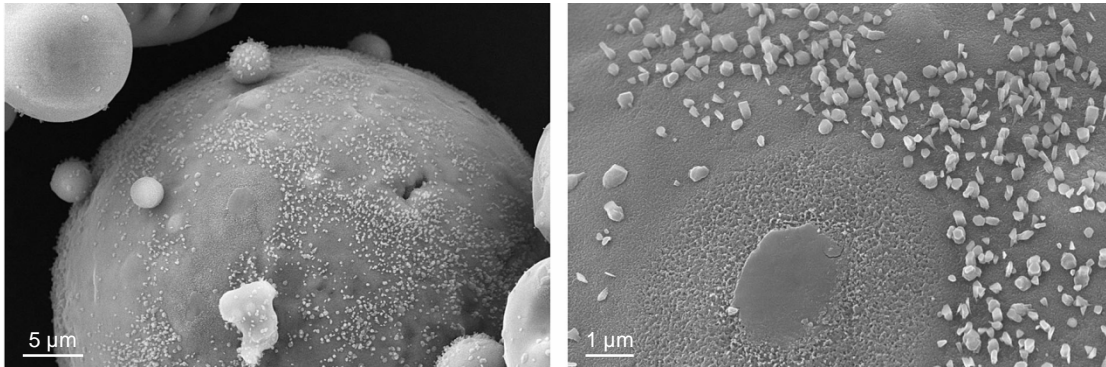
Insgesamt wurden vereinzelte Beobachtungen zur Adsorption und Desorption von Umgebungsfeuchte sowie deren Rolle auf das Pulververhalten gemacht. Dabei handelt es sich um einzelne Bausteine, ein genaues Verständnis des Effektes und seiner Kinematik wird dadurch nicht ermöglicht. So wurden beispielsweise noch keine Sorptionsisothermen für LBM-Pulver ermittelt.

### **3.3.2 Reaktionen mit Umgebungsfeuchte an der Partikeloberfläche**

Liegt adsorbierte Feuchte auf der Partikeloberfläche vor, kann es zu chemischen Reaktionen zwischen dem Werkstoff und den Wassermolekülen auf der Partikeloberfläche kommen.

BAUER ET AL. (2017) zeigen mittels REM-Aufnahmen ein Reaktionsprodukt, das bei der Auslagerung eines AlSi10Mg-Pulvers bei 55 °C und 80,4 % r. F. über 72 Stunden entsteht (Abbildung 17). Das Reaktionsprodukt bildet sich in Form feiner Kristalle (< 1 µm), die von der Partikeloberfläche nach außen wachsen. Als Erklärungsansatz wird die Bildung der Aluminiumhydroxide Bayerit Al(OH)<sub>3</sub> und/oder Böhmit AlO(OH) vermutet. CORDOVA ET AL. (2017) beobachten bei der Befeuchtung von AlSi10Mg bei 50 °C, 80 % r. F. über 72 Stunden eine Verfärbung

des Pulvers. Es bildet sich eine hellgraue Schicht an der Oberfläche der Pulverschüttung, während das Pulver in tieferen Bereichen der Schüttung dunkler wird.



*Abbildung 17: Reaktionsprodukt auf der Partikeloberfläche nach Auslagerung bei 55 °C in 80,4 % relativer Feuchte über 72 Stunden ( BAUER ET AL. 2017)*

Insgesamt gilt es bei der Rolle der Feuchtigkeit auf das Pulvermaterial beim Laserstrahlschmelzen zwischen Adsorption von Wassermolekülen und der chemischen Reaktion der Feuchte mit dem Werkstoff zu unterscheiden. Beide Aspekte wurden im Kontext des Laserstrahlschmelzens wenig untersucht. Es konnte vereinzelt gezeigt werden, dass Feuchtigkeit auf die Fließfähigkeit des Pulvers und die resultierende Bauteildichte wirkt. Bei Aluminiumlegierungen wird eine Bildung von Aluminiumhydroxiden durch erhöhte Feuchtigkeit vermutet. Die Feuchtesorption im Pulvermaterial sowie die Bildung von Reaktionsprodukten auf der Partikeloberfläche wurden bisher wenig untersucht. Gerade über die Wirkung dieser Aspekte auf die Bauteilqualität beim Laserstrahlschmelzen herrscht aktuell Unklarheit. Beim Einsatz des Laserstrahlschmelzens in der Produktion werden Maßnahmen zur Qualitätssicherung vorgesehen, um die aufgezeigten Einwirkungen auf das Pulver entlang der Prozesskette zu berücksichtigen. Im folgenden Abschnitt wird genauer auf diese Aspekte eingegangen.

### **3.4 Produktionstechnische Umsetzung des Pulverrecyclings**

Pulverrecycling wird in der industriellen Praxis des Laserstrahlschmelzens häufig angewendet. In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, wie in der Produktion mit den möglichen damit verbundenen Alterungsmechanismen umgegangen wird. Hierbei



bilden das Vorgehen beim Sieben und Mischen von Pulverchargen sowie die Limitierung der Wiederverwendung des Pulvers die wesentlichen Stellhebel.

### 3.4.1 Vorgehen beim Sieben

Zur Entfernung der im Prozess eingebrachten Prozessspritzer und sonstiger Partikelagglomerate wird Recyclingpulver vor der Wiederverwendung gesiebt. Die relevanten Parameter beim trockenen Siebvorgang sind die verwendete Maschenweite des Siebs sowie die genutzte Atmosphäre. Die verwendeten Maschenweiten orientieren sich in der Regel an den nach DIN 66165-1 und DIN ISO 3310-1 standardisierten Größen, die sich für die Siebenanalyse von Pulvern etabliert haben. Durch Fertigungstoleranzen und Abnutzung des Siebes kann die tatsächliche Maschenweite vom Sollwert abweichen. Für die Wahl der geeigneten Maschenweite beim Sieben von Recyclingpulvern existiert keine normative Vorgabe. Wie in Tabelle 6 gezeigt, werden in der Regel Maschenweiten genutzt, die deutlich über dem  $d_{90}$ -Durchmesser der verwendeten Partikelgrößenverteilung liegen.

*Tabelle 6: Verwendete Maschenweiten beim Sieben und entsprechende Partikelgrößenverteilungen des Ausgangspulvers*

	Hann 2016*	Asgari et al. 2017	Kriewall et al. 2017 *	Strondl et al. 2015 *	Liu et al. 2015	Slotwinski et al. 2014	Jacob et al. 2017	Sartin et al. 2017	Moylan et al. 2013
Werkstoff	IN718	AlSi-10Mg	1.4307	IN718	1.4404	17-4SS	17-4PH	1.4404	alle
$d_{10}$ (in $\mu\text{m}$ )	30	-	13	16	23	24	24	-	-
$d_{50}$ (in $\mu\text{m}$ )	40	-	25	31	39	37	35	-	-
$d_{90}$ (in $\mu\text{m}$ )	58	-	37	46	45	55	49	-	-
Maschenweite (in $\mu\text{m}$ )	<b>53</b>	<b>60</b>	<b>63</b>	<b>63</b>	<b>75</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>

Bei der Wahl der Maschenweite besteht ein Zielkonflikt. Enge Siebe ermöglichen eine hohe Separierungsquote der eingebrachten Spritzer, die Siebdauer nimmt allerdings mit feineren Maschenweiten zu und es wird eine häufigere Reinigung

notwendig. Weiterhin besteht bei zu feinen Sieben die Gefahr, dass auch grobe Fraktionen des Ausgangspulvers entfernt werden. Für die beim Laserstrahlschmelzen verwendeten Pulver werden Maschenweiten zwischen 53  $\mu\text{m}$  und 80  $\mu\text{m}$  genutzt. Dabei ist die verwendete Siebmaschenweite in der Regel größer als der  $d_{90}$ -Durchmesser. Ein klarer Zusammenhang der Maschenweite zu der Partikelgrößenverteilung oder den Werkstoffen ist nicht zu erkennen, was für eine qualitative und erfahrungsbasierte Wahl der Siebe spricht. Die Atmosphäre während des Siebvorgangs wird allgemein nicht erwähnt und nicht durch Standards vorgegeben. Grundsätzlich sind hier die Nutzung von Schutzgas oder das Sieben unter Umgebungsatmosphäre üblich.

Durch das Sieben wird ein großer Anteil der entstandenen Spritzer vom wiederverwendeten Pulver separiert. LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018A) messen beispielsweise einen Überkornanteil von 43 % bis 50 % beim Sieben von Prozessspritzern aus AlSi10Mg mit 75  $\mu\text{m}$  Maschenweite. Gleichzeitig wird ein Teil der Spritzer nicht entfernt und verbleibt im Recyclingpulver. Es gilt zu beachten, dass es beim Sieben aufgrund von Fertigungstoleranzen des Siebs und der nicht idealen sphärischen Partikelform zu keiner scharfen Trennung der Partikelgrößenverteilung kommt, sondern vielmehr zu einem kontinuierlichen Übergang. Umso feiner das Sieb, desto höher ist die zu erwartende Unschärfe.

#### **3.4.2 Anwendung von Pulvermischkonzepten**

Die grundsätzlichen Pulvermischkonzepte wurden in Unterabschnitt 2.2.3 beschrieben. In diesem Unterabschnitt wird zusammengefasst, welche Konzepte bei der Umsetzung des Pulverrecyclings genutzt werden. STRONDL ET AL. (2015) mischen dem Recyclingpulver 5 % zusätzliches Neupulver zu. Dies entspricht einem kontinuierlichen Auffrischen. GRAINGER (2016) gibt an, dass das Pulver im Pulverreservoir nachgefüllt wird, so dass das Neupulver auf dem bereits verwendeten Pulver liegt und beim nächsten Zyklus zuerst verbraucht wird. Es wird somit eine Variante des kontinuierlichen Auffrischens angewendet. JACOB ET AL. (2017) wählen einen gegensätzlichen Ansatz, in dem das wiederverwendete Pulver auf das Neupulver im Pulverreservoir geschüttet wird. Dadurch wird das Altpulver zuerst verarbeitet. Dabei handelt es sich um eine Form des kontinuierlichen Auffrischens. SARTIN ET AL. (2017) mischen kein Neupulver zu, sondern führen Recyclingpulverchargen mit gleicher Historie (i. e. gleiche Zyklenzahl) zusammen. Dies entspricht dem Konzept der kollektiven Alterung. Insgesamt zeigt sich, dass kein einheitliches Vorgehen genutzt wird, sondern dass beide grundsätzlichen

---

Pulvermischkonzepte verfolgt werden. Beim kontinuierlichen Auffrischen kann durch die Reihenfolge der Befüllung der Pulverchargen in die Anlage der jeweilige Verbrauch beeinflusst werden.

### **3.4.3 Einschränkung des Pulverrecyclings**

Vor dem Hintergrund der Qualitätssicherung besteht eine zentrale Fragestellung beim Pulverrecycling darin, ob und wie die Wiederverwendung begrenzt wird. Bei der Limitierung der Wiederverwendung in der industriellen Praxis zeigt sich ein heterogenes Bild. Auf der einen Seite gibt es Anwender des Laserstrahlschmelzens, die das Pulvermaterial uneingeschränkt wiederverwenden. Auf der anderen Seite wird bei einzelnen Anwendungen ausschließlich Neupulver verwendet, was ein Recycling ausschließt (HANN 2016). SLOTWINSKI ET AL. (2014) weisen darauf hin, dass der Wahl der Limitierung der Wiederverwendung selten eine systematische Entscheidungsfindung zugrunde liegt. Es existieren unterschiedliche Kennzahlen, um den Alterungszustand des Pulvers auszudrücken. Am häufigsten wird die Anzahl der Verwendungszyklen (Zyklenzahl) genutzt. Als Alternativen wurden die Verweildauer des Pulvers in der Anlage, die Dauer der Verarbeitung im Prozess oder eine Kombination dieser Kennwerte vorgeschlagen (NASA 2017A). Empfehlungen zu konkreten Grenzwerten existieren kaum. Lediglich eine technische Richtlinie der *US National Aeronautics and Space Administration (NASA)* schlägt einen ersten Richtwert vor (NASA 2017A). Dabei wird zwischen zwei Werkstoffgruppen unterschieden. Oxidierende Materialien (z. B. Aluminium- und Titanlegierungen) sollten demnach nicht öfter als 10 Mal verwendet, nicht länger als 500 Stunden verarbeitet und nicht länger als 30 Tage in der Anlage aufbewahrt werden. Bei nicht oxidierenden Werkstoffen liegen die entsprechenden Grenzen bei 30 Zyklen, 1.000 Stunden und 60 Tagen. Neben der Limitierung anhand von Alterungskennzahlen wird auch die Möglichkeit vorgeschlagen, den Zustand des Pulvers beim Recycling kontinuierlich zu überprüfen (SUTTON ET AL. 2017).

Insgesamt wird die Beschränkung des Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen auf unterschiedliche Weisen gehandhabt. In der industriellen Praxis werden anwendungsspezifische Limitierungen für das Pulverrecycling genutzt. Teilweise wird ganz von einer Wiederverwendung abgesehen. Der Alterungsgrad des Pulvers wird in der Literatur vornehmlich durch die Anzahl der Zyklen charakterisiert, über die das Pulvermaterial wiederverwendet wurde. Aufgrund des geringen

Erfahrungswissens im Umgang mit der Fertigungstechnologie bestehen aktuell kaum Richtwerte für Limitationen.

### 3.5 Fazit

#### 3.5.1 Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse

Der Stand der Forschung und Technik zeigt, dass sich die Pulverqualität durch die Wiederverwendung verändern kann. Im Hinblick auf die Änderung des Pulvers durch Recycling wurde unterschiedliches Verhalten beobachtet, das je nach Werkstoff und Anlage variiert. In einigen betrachteten Anwendungsfällen ändert sich die Bauteilqualität durch die Wiederverwendung. Werkstoffübergreifend werden vielfach eine Vergrößerung des Pulvers sowie ein Anstieg der Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente beobachtet. Erklärungsansätze für die identifizierten Änderungen werden teilweise formuliert, gleichzeitig sind die Ursachen für Änderungen vielfach unklar. Die Tatsache, dass sich die Alterung bei gleichem Werkstoff unterschiedlich verhält, deutet darauf hin, dass bei den Untersuchungen relevante Einflussgrößen nicht betrachtet wurden. So werden beispielsweise die gefertigte Baujobgeometrie oder das angewendete Pulvermischkonzept kaum berücksichtigt.

Die Einbringung von Prozessspritzern in das Pulver und die Interaktion mit Umgebungsfeuchte können als werkstoffübergreifende Mechanismen verstanden werden, die eine Änderung des Pulverzustands beim Recycling bedingen. Gerade die Entstehung von Prozessspritzern wurde vielfach beobachtet und mit Defekten im Gefüge aufgrund von unvollständigem Aufschmelzen in Verbindung gebracht. Bei der Feuchtigkeit kann zwischen der Adsorption von Wassermolekülen und der chemischen Reaktion der Feuchte mit dem Werkstoff unterschieden werden. Beide Aspekte wurden im Kontext des Laserstrahlschmelzens nur wenig untersucht.

Das Pulverrecycling wird in der industriellen Praxis sehr unterschiedlich angewendet. Das Spektrum reicht von einmaliger Nutzung des Pulvers bis zu unbegrenzter Wiederverwendung. Eine Begrenzung des Recyclings wird in der Regel durch eine maximale Zyklenzahl spezifiziert, auch wenn diese Kennzahl die tatsächlichen Belastungen auf das Pulver nicht zwangsläufig präzise widerspiegelt. Durch das Sieben nach dem LBM-Prozess wird ein Großteil der eingebrachten Spritzer entfernt, jedoch verbleibt auch immer ein Teil (i. e. eingebrachtes Spritzerunterkorn) im Recyclingpulver. In der Literatur werden unterschiedliche

---

Pulvermischkonzepte eingesetzt, ohne dass deren Verwendung genauer begründet oder systematisch ausgewählt wurde.

Aufgrund der geringen Erfahrungsbasis mit dem Laserstrahlschmelzen als Fertigungstechnologie besteht eine hohe Unsicherheit bezüglich der Anwendung des Pulverrecyclings und dem damit verbundenen Einfluss auf die Bauteilqualität. Es existieren keine Richtlinien für eine qualitätsorientierte Umsetzung des Pulverrecyclings. Der Umgang mit dem Pulverrecycling wird häufig durch Vorsicht geprägt und in der Regel ohne eine systematische Vorgehensweise entschieden. Gleichzeitig wird ein Recycling befürwortet und zugelassen, sofern der Nachweis erbracht wurde, wie es sich auf die Bauteileigenschaften auswirkt und wenn dies bei der Bauteilauslegung berücksichtigt wird.

### **3.5.2 Handlungsbedarf**

In den bisherigen Untersuchungen wurden Änderungen des Pulverzustands, die sich aus einem oder mehr Nutzungszyklen ergeben, gemeinsam betrachtet. Dabei wurde wenig auf die Einzeleffekte eingegangen, aus denen sich die Zustandsänderungen zusammensetzen. Für ein besseres Verständnis der Wirkung des Pulverrecyclings auf die Pulverqualität ist es sinnvoll die möglichen Änderungen auf der Ebene der Einzeleffekte zu untersuchen.

Weiterhin zeigt sich die Notwendigkeit für ein allgemeingültiges Vorgehen zur Qualifizierung des Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen. Dies kann dazu beitragen, die Unsicherheit bei Anwendern der Technologie zu reduzieren und somit eine weitreichendere Wiederverwendung des Pulvers zu befähigen. Wenn durch ein besseres Verständnis des Alterungsverhaltens eine Begrenzung der Nutzungszyklen aufgehoben oder hin zu einer höheren maximalen Zyklenzahl verschoben wird, reduziert dies Materialverluste und verbessert die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und Technik können Anforderungen an dieses Vorgehen abgeleitet werden. Da das Änderungsverhalten stark von dem jeweiligen konkreten Anwendungsfall abhängt, ist eine Einzelfallbetrachtung zielführend. Die auf das Pulvermaterial wirkenden Belastungen und die sich daraus ergebende Reaktion hängen unter anderem vom Werkstoff, von der verwendeten LBM-Anlage, der genutzten Pulvermischstrategie und weiteren Faktoren (Bauteilgeometrie, Umgebungsfeuchte etc.) ab. Das Vorgehen sollte dabei unterstützen, die operative Umsetzung der

Wiederverwendung des Pulvers (z. B. Siebung, Mischkonzept, Limitierung) zu gestalten. Weiterhin sollte ein Nachweis über die Wirkung des Recyclings auf die Bauteilqualität erfolgen. Vor allem die Einbringung von Prozessspritzern sowie die Interaktion mit Umgebungsfeuchte stellen relevante Effekte dar, die bei der Qualifizierung des Recyclings zu berücksichtigen sind. Dabei ist über den bisherigen Erkenntnisstand hinaus zu untersuchen, wie die Einbringung von Prozessspritzern die Bauteileigenschaften (v. a. dynamische Festigkeit) beeinflusst. In diesem Kontext spielt das eingebrachte Spritzerunterkorn (ESUK) eine zentrale Rolle. Weiterhin können allgemeine Richtlinien zu einer qualitätsorientierten Umsetzung des Pulverrecyclings eine zusätzliche Unterstützung darstellen. Diese sollen daher im weiteren Verlauf erarbeitet werden.

## 4 Identifizierung und Kategorisierung von Änderungseffekten

In diesem Kapitel werden die Effekte, die zu einer Änderung des Pulverzustands beim Recycling beitragen, genauer betrachtet. Dazu werden Änderungen der Pulverqualität auf der Ebene unabhängiger Einzeleffekte untersucht. Das Kapitel zielt darauf ab, das Auftreten der Effekte experimentell zu analysieren und diese darauf basierend bewerten zu können. Als Ergebnis werden die Effekte anhand ihrer Bedeutung für die Qualitätssicherung beim Pulverrecycling klassifiziert. Sofern möglich, werden Maßnahmen zur Vermeidung der Änderung abgeleitet. Der Betrachtungsgegenstand umfasst die gesamte Prozesskette des Laserstrahlschmelzens. Das Vorgehen innerhalb des Kapitels wird in Abbildung 18 zusammengefasst.

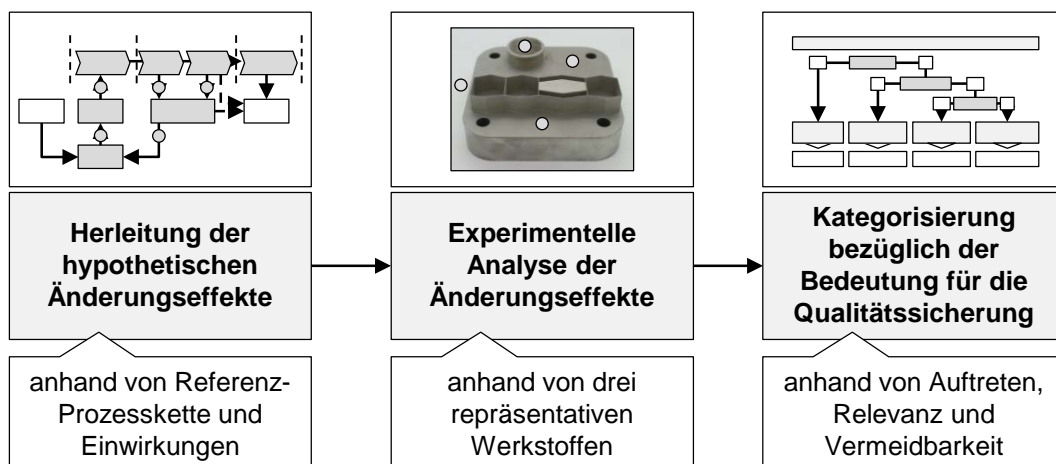


Abbildung 18: Vorgehen zur Identifizierung, Analyse und Bewertung der Änderungseffekte im Rahmen von Kapitel 4

Im ersten Schritt werden die hypothetischen Änderungseffekte auf theoretischer Basis hergeleitet. Anschließend werden diese Effekte anhand von exemplarischen und repräsentativen Werkstoffen experimentell analysiert. Basierend auf den Erkenntnissen werden Maßnahmen zur Vermeidung der Effekte abgeleitet. Im dritten Schritt werden die Änderungseffekte basierend auf den Ergebnissen der Analyse hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Qualitätssicherung bewertet und kategorisiert.

### 4.1 Herleitung hypothetischer Änderungseffekte

Die Herleitung von hypothetischen Änderungseffekten stellt den ersten Teil des Vorgehens dar. Die Betrachtung ist unabhängig von dem verwendeten Werkstoff, Anlagentyp und den applizierten Prozessparametern. Das Vorgehen basiert auf einer Prozesskettenbetrachtung in Kombination mit möglichen Einwirkungen auf das Pulvermaterial innerhalb der einzelnen Schritte. Es orientiert sich dabei methodisch an einer prozessorientierten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), bei der einzelne Prozessschritte hinsichtlich möglicher Fehler untersucht werden (vgl. Unterabschnitt 2.2.2). Für die Beschreibung der Einwirkungen auf das Pulver kann auf die Grundlagen zu Pulvermaterialien zurückgegriffen werden. Weiterhin fließen die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und Technik zu bereits beobachteten Änderungen von Pulvereigenschaften und dazugehörigen Erklärungsansätzen mit ein. Ergebnis dieses Bausteins ist eine Liste hypothetischer Änderungseffekte, welche die relevanten Pulvereigenschaften durch die Wiederverwendung beim Laserstrahlschmelzen theoretisch beeinflussen können. Eine experimentelle Bewertung der Effekte wird nachfolgend durchgeführt.

#### 4.1.1 Systemdefinition

Als Betrachtungssystem für die Identifizierung der hypothetischen Änderungseffekte wird eine allgemeingültige Prozesskette für das Pulverrecycling verwendet. Diese wird im Folgenden als Referenzprozesskette bezeichnet und ist in Abbildung 19 dargestellt.

Die Referenzprozesskette orientiert sich an der allgemeinen Prozesskette des Laserstrahlschmelzens (Abbildung 7). Der Wareneingang des Pulvermaterials am Produktionsstandort sowie die Übergabe des gefertigten Bauteils an die Bauteilnachbearbeitung stellen die Grenzen des Systems dar. Die Bauteilentnahme beinhaltet das Ausbauen der Bauplatte und das Reinigen der Baukammer. Die Handhabungsschritte bedeuten einen Wechsel des Behältnisses (i. e. Schüttvorgang) und/oder der Atmosphäre (i. e. Schutzgas oder Umgebungsluft).



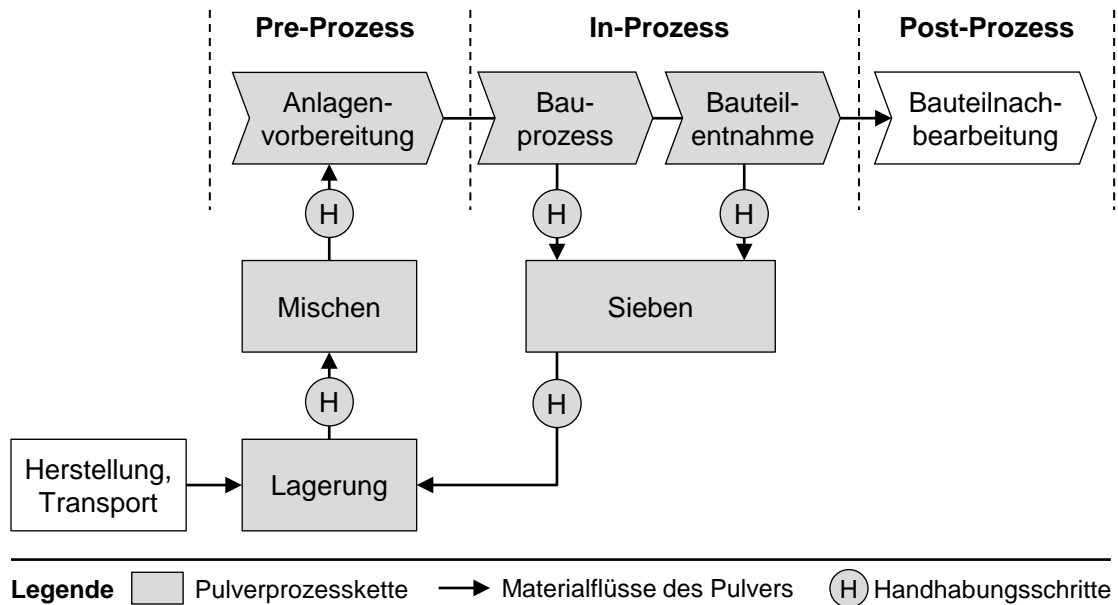


Abbildung 19: Referenzprozesskette des Pulvermaterials beim Laserstrahlschmelzen unter Berücksichtigung des Pulverrecyclings

Es wird davon ausgegangen, dass nur ein Material beim LBM-Prozess und in der Prozesskette verarbeitet wird (i. e. Monomaterialverarbeitung). Die Einbringung von Querkontaminationen, Fremdpartikeln oder anderen Fremdstoffen (Staub, Abrieb etc.) wird daher nicht berücksichtigt.

#### 4.1.2 Einwirkungen auf das Pulver entlang der Prozesskette

Bei den für das Pulverrecycling notwendigen Schritten wirken unterschiedliche Einflüsse und Belastungen auf das Pulvermaterial. Basierend auf den Einwirkungen können, wie in Tabelle 7 aufgeführt, hypothetische Änderungseffekte aufgestellt werden. Diese wurden aus der Grundlagenliteratur, den Vorarbeiten im Stand der Forschung und Technik sowie aus Expertengesprächen abgeleitet. Die Einwirkungen und identifizierten Effekte beziehen die Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 und 3 ein. Zu den Änderungseffekten werden die jeweils beeinflussten Pulvereigenschaften angegeben. Weiterhin wird die betroffene Pulvermenge qualitativ beschrieben. Die Effekte werden im weiteren Verlauf mit Buchstabenkürzeln abgekürzt (z. B. AF – Adsorption von Feuchtigkeit). Insgesamt ergeben sich neun hypothetische Änderungseffekte entlang der Prozesskette. Das Auftreten der hypothetischen Effekte und deren Wirkung wird in Abschnitt 4.2 genauer untersucht.

Tabelle 7: Herleitung der hypothetischen Änderungseffekte für die Referenzprozesskette anhand der Einwirkungen entlang der Pulverprozesskette

Schritt der Prozesskette	Einwirkungen auf das Pulver	Hypothetische Änderungseffekte	Betroffene Pulvereigenschaft	Betroffene Pulvermenge
<b>Bauprozess: Allgemein</b>	Wärmeeinwirkung durch Vorheizung	Thermisch induzierte Oberflächenreaktion des Pulverbetts [TO]	NMOE	Pulverbett
	Schutzgasströmung über das Pulverbetts	Aerosolbildung durch Schutzgasstrom [AS]	PGV	Aerosol
<b>Bauprozess: Beschichten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Scherkräfte innerhalb der Pulverwalze</li> <li>▪ Wärmeeinwirkung durch Vorheizung</li> </ul>	Deagglomeration durch Beschichten [DB]	PGV	Aufgezogenes Pulver
<b>Bauprozess: Belichten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selektive Wärmeeinwirkung durch Laserstrahlung</li> </ul>	Spritzerbildung und -einbringung in das Pulverbett [SE]	PGV, PF, NMOE	Pulverbett und Pulver im Bauraum
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wärmeeinwirkung durch Vorheizung</li> </ul>	Versintern von Pulverpartikeln in bauteilnahen Bereichen [VB]	PGV, PF, NMOE	Bauteilnahes Pulver
<b>Bauteil-entnahme</b>	Umgebungsatmosphäre im Bauraum	Reaktion mit Umgebungsatmosphäre [RU]	NMOE	Pulverbett und Pulver im Bauraum
<b>Sieben</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Staubbildung durch Vibration</li> <li>▪ Reibung an Oberflächen</li> </ul>	Anhaftungen an Oberflächen [AO]	PGV	Anhaftendes Pulver
<b>Lagerung</b>	Eindringen der Umgebungsatmosphäre in den Lagerbehälter	Adsorption von Feuchtigkeit [AF]	F	Oberfläche der Pulverschüttung
		Reaktion mit Umgebungsatmosphäre [RU]	H	
<b>Mischen</b>	Reibung an Oberflächen (Behälter)	Anhaftungen an Oberflächen [AO]	PGV	Anhaftendes Pulver
<b>Handhabung</b>	Staubbildung beim freien Fließen des Pulvers	Aerosolbildung beim Umfüllen [AU]	PGV	Aerosol

Schritt der Prozesskette	Einwirkungen auf das Pulver	Hypothetische Änderungseffekte	Betroffene Pulvereigenschaft	Betroffene Pulvermenge
	Reibung an Oberflächen (Behälter, Leitungen, Hilfsmittel)	Anhaftungen an Oberflächen [AO]	PGV	Anhaftendes Pulver
	Kontakt mit Umgebungsatmosphäre	Adsorption von Feuchtigkeit [AF]	F	Oberfläche der Pulverschüttung
		Reaktion mit Umgebungsatmosphäre [RU]	H	
<b>Legende:</b> F - Feuchtigkeit (adsorbiert); H - Wasserstoffgehalt; PGV - Partikelgrößenverteilung; PF - Partikelform; NMOE - Nichtmetallische Oberflächenelemente				

## 4.2 Experimentelle Analyse der Änderungseffekte

Im zweiten Teil des Vorgehens werden die identifizierten hypothetischen Änderungseffekte experimentell analysiert. Dabei werden drei Ziele verfolgt: Erstens gilt es das **Auftreten** der einzelnen hypothetischen Effekte nachzuweisen. Dabei kann grundlegend zwischen auftretenden und unbestätigten Effekten unterschieden werden. Zweitens sollen für die bestätigten Effekte die **Möglichkeiten zur Vermeidung** ermittelt werden. Einfach zu vermeidende Effekte sollen im Hinblick auf die Anwendung der Technologie in der Produktion über Richtlinien ausgeschlossen werden. Drittens wird die **Relevanz** der Effekte aus Sicht der Qualitätssicherung abgeschätzt. Je gravierender die Änderung der Pulverqualität ausfällt, desto höher liegt die Bedeutung des Effektes. Dabei können als Kriterien die betroffene Pulvermenge sowie die Intensität der Eigenschaftsänderung genutzt werden. Diese Kriterien werden als Indikator für die Bedeutung des Effektes genutzt, da eine Wirkung auf den Gesamtzustand des Pulvers und damit auf die Bauteilqualität nur bei Beeinflussung eines ausreichend großen Anteils des Pulvers mit einer ausreichend hohen Intensität zu erwarten ist. Die Bewertung wird im weiteren Verlauf basierend auf den experimentellen Ergebnissen für jeden Einzeleffekt genauer erläutert.

Die Effekte können für diese Untersuchung in zwei Gruppen geteilt werden. Ein Teil der Effekte tritt während des LBM-Prozesses auf. Die experimentellen Ergebnisse sind gültig für die spezifische Kombination aus dem verarbeiteten Pulver und der verwendeten Anlage. Der andere Teil der Effekte tritt abseits der Anlage auf, so dass Ergebnisse spezifisch für das jeweilige Pulvermaterial, aber

unabhängig von der Anlage sind. Für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieses Abschnitts werden Daten aus BOISSERÉE 2018 verwendet.

Zur Einordnung des Vorgehens gilt es zu beachten, dass sich die Bewertung der Wirkung der Effekte auf den Zustand des Pulvers (Pulverqualität) bezieht und nicht direkt auf die Bauteilqualität. Dies stellt einen Zwischenschritt dar, in dem eine Fokussierung auf die sich ändernden Pulvereigenschaften vorgenommen wird. Der Bezug zur Bauteilqualität wird anschließend im Kapitel 6 hergestellt. Die neun Effekte werden einzeln und unabhängig voneinander betrachtet. Wechselwirkungen werden aufgrund der Anzahl der untersuchten Effekte und der Unklarheit über deren jeweiliges Auftreten in diesem Schritt nicht berücksichtigt.

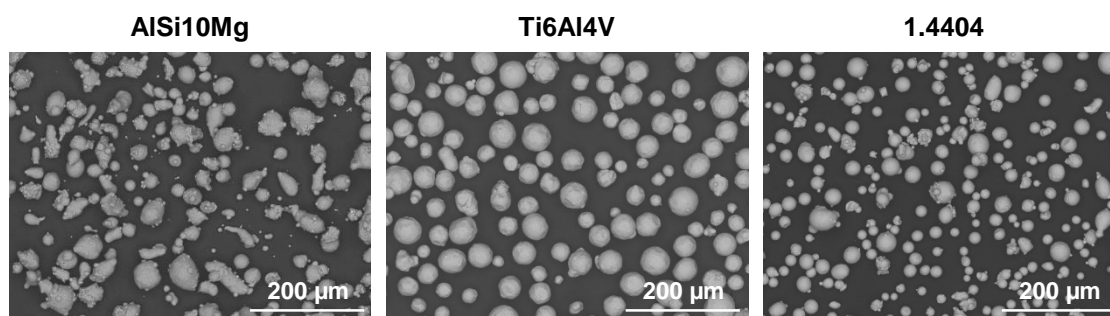
Für die Untersuchung der Effekte werden **drei Werkstoffe** ausgewählt, die jeweils eine der drei wichtigsten Materialgruppen beim Laserstrahlschmelzen repräsentieren. Laut HOELZLE ET AL. (2017) und WATERMAN (2017) bilden Aluminium-, Titanlegierungen und Edelstähle aktuell die drei am häufigsten verwendeten Materialgruppen beim Laserstrahlschmelzen. Dies verhält sich konsistent zu der Nennungshäufigkeit der Werkstoffe im Stand der Forschung und Technik. Innerhalb der drei Werkstoffgruppen werden als bedeutendste Stellvertreter die Legierungen AlSi10Mg, Ti6Al4V und der Edelstahl 1.4404 verwendet. Es wurden jeweils kommerziell verfügbare Pulvermaterialien genutzt, deren Eigenschaften im Ausgangszustand in Tabelle 8 beschrieben werden. Details zu den verwendeten Messmethoden für die untersuchten Pulvereigenschaften werden im Anhang beschrieben (vgl. Anhang A1).

*Tabelle 8: Ausgangszustand der drei ausgewählten Pulvermaterialien*

Eigenschaft	Messmethode	AlSi10Mg	Ti6Al4V	1.4404
Partikelgrößenverteilung (PGV) in $\mu\text{m}$	Laserbeugung	$d_{10} = 23,4 \pm 0,1$ $d_{50} = 40,1 \pm 0,4$ $d_{90} = 64,3 \pm 0,7$	$d_{10} = 31,6 \pm 0,1$ $d_{50} = 44,9 \pm 0$ $d_{90} = 60,2 \pm 0,1$	$d_{10} = 18,8 \pm 0$ $d_{50} = 32,3 \pm 0$ $d_{90} = 50,5 \pm 0$
Qualitative Partikelform (PF)	REM-Aufnahmen	Unregelmäßig, teils sphärisch	Vorwiegend sphärisch	Vorwiegend sphärisch
Sauerstoffgehalt (O) in ppm		$2.081 \pm 65$	$1.625 \pm 64$	$276 \pm 6$
Stickstoffgehalt (N) in ppm	Heißgasextraktion	$55 \pm 9$	$139 \pm 7$	$112 \pm 4$
Wasserstoffgehalt (H) in ppm		$39,8 \pm 2,6$	$28,9 \pm 1,0$	$3,65 \pm 0,3$

---

Stickstoff spielt im Werkstoffsystem AlSi10Mg eine untergeordnete Rolle (BUCHBINDER ET AL. 2010, HORNBOGEN ET AL. 2012). Da die Konzentration mit allgemein unter 70 ppm vernachlässigbar gering ist, wird das Element in diesem Abschnitt nicht weiter berücksichtigt. Die Partikelform der drei Pulvermaterialien ist in Abbildung 20 zusammengestellt.



*Abbildung 20: Qualitative Partikelform der drei Pulvermaterialien im Ausgangszustand, REM-Aufnahmen ( $U = 15$  kV, BSE-Sensor)*

In den Aufnahmen ist auch qualitativ zu erkennen, dass das Edelstahlpulver am feinsten ist. Weiterhin weist das AlSi10Mg-Pulver eine vorwiegend unregelmäßige Partikelform auf, während die anderen beiden Pulver durchgehend sphärische Partikel beinhalten.

#### **4.2.1 Effekte im Laserstrahlschmelzprozess**

In diesem Unterabschnitt wird ein Referenzbaujob beschrieben, anhand dessen mehrere Änderungseffekte in einem gemeinsamen Versuch untersucht werden können. Anschließend werden die Analysen der Änderungseffekte im LBM-Prozess für die drei ausgewählten Werkstoffe beschrieben. Jeder Effekt wird dabei hinsichtlich der Bedeutung für die Pulverqualität und somit für die Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen diskutiert.

Für die Experimente wird mit der LBM-Anlage SLM125HL der Firma SLM Solutions eine kommerzielle und produktionstaugliche Anlage nach aktuellem Stand der Technik ausgewählt. Die verwendeten Prozessparameter sind im Anhang detailliert aufgeführt (vgl. Anhang A2). Sie orientieren sich eng an den vorgegebenen Standardparametern des Anlagenherstellers. Eine Anpassung der Prozessparameter in der laufenden Produktion, beispielsweise zur Vermeidung der betrachteten Änderungseffekte, wird für die weitere Betrachtung ausgeschlossen, da diese beim Einsatz des Laserstrahlschmelzens im Rahmen der Produktion als

Einflussgröße auf das Prozessergebnis konstant gehalten werden. Dies stellt in der Regel eine Vorgabe für die Zulassung des Fertigungsprozesses dar (KRAUSS 2017).

Da das Sieben einen obligatorischen Bestandteil der Prozesskette vor der Wiederverwendung von Recyclingpulver darstellt, werden alle Pulverproben vor der Charakterisierung gesiebt. Die Siebmaschenweite wurde basierend auf den Erkenntnissen aus dem Unterabschnitt 3.4.1 auf 75 µm festgelegt. Dies entspricht einem durchschnittlichen Wert und ist im Einklang mit den Vorgaben des Anlagenherstellers. Das Überkorn aus dem Recyclingpulver wird entsorgt, so dass diese Partikel den Zustand des Pulvers im nächsten Zyklus nicht beeinflussen.

### 4.2.1.1 Baujob zur Untersuchung der Effekte im LBM-Prozess

Die Effekte während des LBM-Prozesses sollten für die Untersuchung zu möglichst wenig Versuchen bzw. Baujobs zusammengefasst werden. In Tabelle 9 sind die benötigten Proben und deren Position in einem Baujob aufgeführt.

*Tabelle 9: Benötigte Pulverproben für die Untersuchung der Änderungseffekte im LBM-Prozess und deren Position im Baujob (die nummerierten Positionen beziehen sich auf Abbildung 21)*

Effekte im LBM-Prozess	Erforderliche Pulverprobe	Probenposition im Baujob
Thermisch induzierte Oberflächenreaktion des Pulverbetts [TO]	Pulver aus Pulverbett	Unbeeinflusste Stelle des Pulverbetts (Position 1)
Deagglomeration durch Beschichten [DB]	Pulver aus Pulverbett	Unbeeinflusste Stellen des Pulverbetts, je nach Beschichtungsrichtung (Positionen 1, 2)
Spritzerbildung und -einbringung [SE]	Reine Prozessspritzer	Neben der Baufläche, je nach Schutzgasstromrichtung (Position 3)
Versintern von Pulverpartikeln in bauteilnahen Bereichen [VB]	Bauteilnahes Pulver mit möglichst hoher Wärmeeinwirkung	In Lamellen eingeschlossenes Pulver im Probenkörper (Position 4)
Aerosolbildung durch Schutzgasstrom [AS]	Aerosol, das aus dem Pulverbett getragen wird	Aerosol im Schutzgasstromauslass (Vorrichtung zum Sammeln der Probe benötigt)

Vier der Effekte können in einem Referenzbaujob zusammengefasst werden. Der Effekt der Aerosolbildung durch den Schutzgasstrom wird in einem zweiten Baujob untersucht. Dabei findet keine Belichtung statt, um die Einflüsse anderer Effekte auszuschließen (z. B. Spritzerbildung). Es ist darauf zu achten, dass bei den Versuchen ausreichend große Probenmengen für die geplanten Messungen erzeugt werden. Der allgemeine schematische Aufbau des Referenzbaujobs sowie eine Umsetzung am Beispiel der LBM-Anlage SLM125HL sind in Abbildung 21 veranschaulicht.

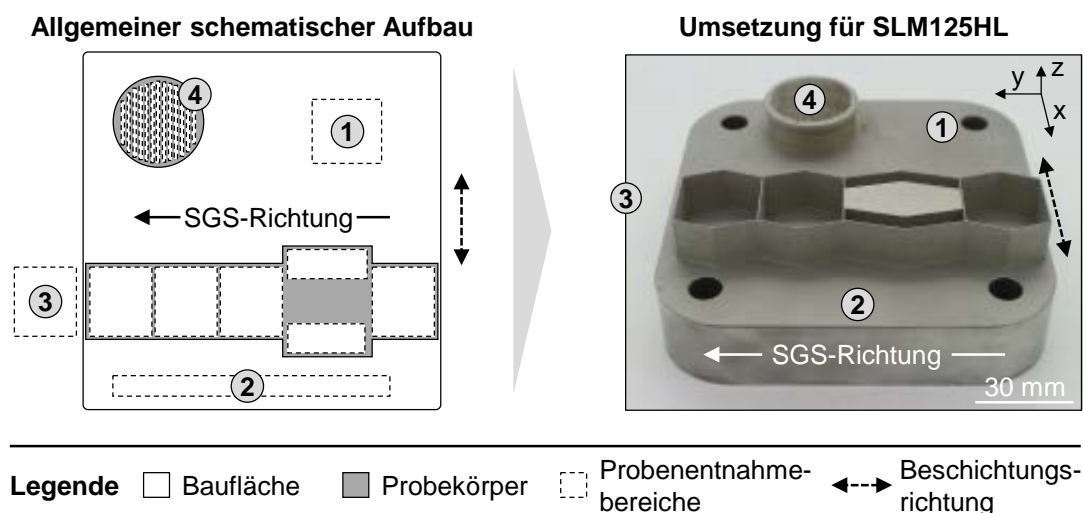


Abbildung 21: Schematischer Aufbau des Baujobs zur Untersuchung der Effekte im LBM-Prozess und Umsetzung am Beispiel der LBM-Anlage SLM125HL

Die allgemeine Anordnung ist für eine rechteckige Baufläche dargestellt und richtet sich in ihrem Aufbau nach der Richtung des Schutzgasstroms (SGS-Richtung). Die Positionierung der Elemente wurde so getroffen, dass die Probekörper jeweils ausschließlich den damit verbundenen Entnahmebereich beeinflussen. Dazu werden diese mit größtmöglichem Abstand zueinander auf der Baufläche angeordnet. Eine entsprechende Variante für eine runde Baufläche ist im Anhang aufgeführt (vgl. Anhang A3). Die beispielhafte Umsetzung berücksichtigt die Konstruktionsregel, dass Bauteilkanten allgemein nicht parallel zum Beschichter angeordnet sein sollten. Teile der Geometrie sind daher leicht angewinkelt. Für die Ansammlung von Prozessspritzern im Probenentnahmebereich 3 wird ein massiver Block verfestigt, der in SGS-Richtung direkt vor diesem Bereich positioniert ist. Die Kammern um den Block herum ermöglichen weiterführend eine grobe Analyse der

räumlichen Verteiler der Prozessspritzer, da sich in diesen Kammern der Anteil an Grobpartikeln erhöht.

Als Probekörper für das Versintern in bauteilnahen Bereichen (VB, Position 4) wird eine Lamellengeometrie mit minimalem Lamellenabstand verwendet, um eine möglichst hohe Wärmeeinbringung bei gegebenen Prozessparametern zu erzeugen. Die Probe besteht aus dem Pulver, das zwischen den Lamellen eingeschlossen wird. Die Wandstärke wird möglichst gering gewählt, um eine maximale Bauteiloberfläche innerhalb der Geometrie zu gewährleisten. Für den Fall der betrachteten Materialien und der gegebenen Anlage liegt die minimale Wandstärke bei 0,5 mm. Analog wurde ein minimaler Lamellenabstand von 0,3 mm bestimmt. Die runde Außenform des Behälters ist so gewählt, dass dieser nach dem Baujob und vor dem Ausbauen mit einem Deckel verschlossen werden kann, um beim Ausbauen des Baujobs kein Probenmaterial zu verlieren.

Für den Effekt der Aerosolbildung werden in einem weiteren Baujob mehrere Schichten mit aktivem Schutzgasstrom, aber ohne Belichtung, aufgetragen. Das Aerosol wird durch Schutzgasstrom abgesaugt, wo eine Vorrichtung zur Sammlung der Aerosolpartikel positioniert wird. Zur Ablagerung der Partikel wird ein Klebestreifen genutzt, der zentral im Schutzgasstromauslass angebracht wird und anschließend mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht werden kann. Die Anzahl der aufgezogenen Schichten ist mit 20 so gewählt, dass sich ausreichend viele Partikel für eine REM-Partikelgrößenanalyse (i. e. mindestens 2.500) auf dem Probenträger absetzen.

Für die folgende Beschreibung der Ergebnisse der Analysen wird eine durchgehende Struktur genutzt. Eingangs wird die Hypothese zum dem jeweiligen Effekt formuliert. Nachfolgend werden die experimentellen Ergebnisse des Versuchs anhand der betroffenen Pulvereigenschaften beschrieben. Anschließend werden die Effekte hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Pulverqualität und die Qualitätssicherung diskutiert.

### **4.2.1.2 Ergebnisse und Diskussion**

#### **Deagglomeration durch Beschichten (Effekt DB)**

Hypothese: Durch die Scherkräfte innerhalb des Pulvers beim Beschichtungsvorgang und/oder durch eine Trocknung des Pulvers infolge der Vorheizung des Pulverbetts werden Agglomerate im Pulver aufgelöst. Dies kann zu einer Verfeinerung des Pulvers im Pulverbett führen.



Ergebnisse Partikelgrößenverteilung: Die Partikelgrößenverteilungen der Proben aus dem Pulverbett (Positionen 1 und 2) im Vergleich zum Ausgangszustand sind in Abbildung 22 graphisch aufbereitet.

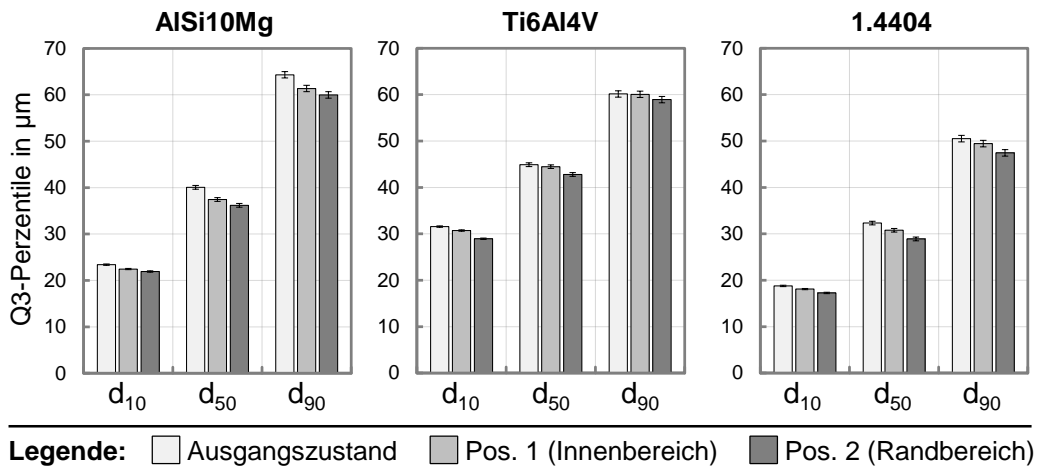


Abbildung 22: Partikelgrößenverteilung vom einmalig aufgezogenem Pulver im Vergleich zum Ausgangszustand, Messung mittels Laserbeugung, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messmethode

Es zeigt sich bei allen drei Werkstoffen eine Verfeinerung der Partikelgrößenverteilung des Pulvers durch das Beschichten im Baujob. Diese fällt im Randbereich stärker aus, als im Innenbereich. Abbildung 23 stellt zusätzlich die Partikelgrößenverteilung eines AlSi10Mg-Pulvers nach bis zu 8-fachem Aufziehen im Rahmen von 8 Verarbeitungszyklen dar.

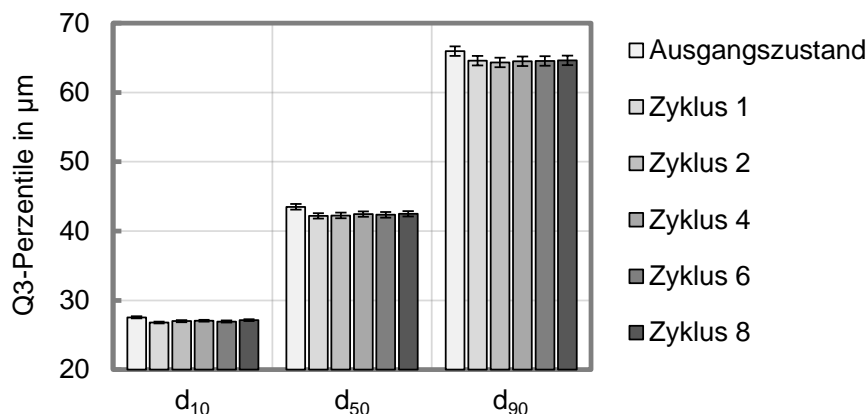


Abbildung 23: Partikelgrößenverteilung von mehrfach aufgezogenem Pulver im Vergleich zum Ausgangszustand, Werkstoff AlSi10Mg, Messung mittels Laserbeugung, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messmethode

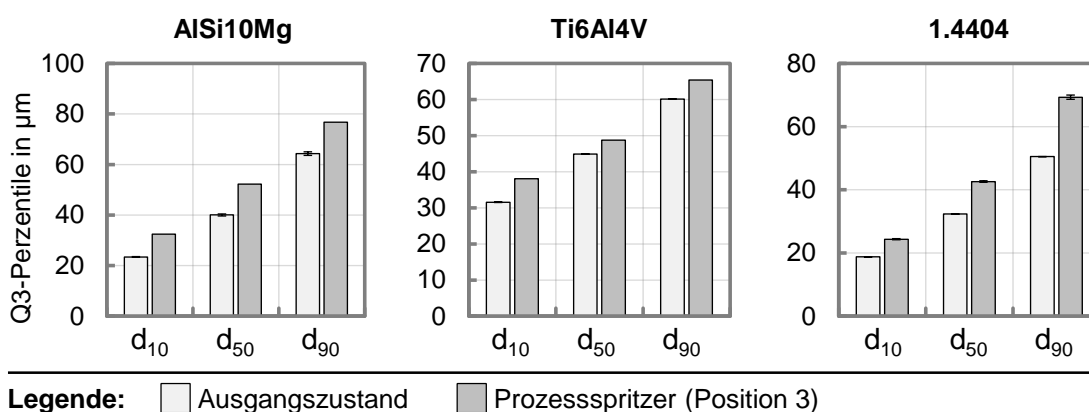
Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Effekt bei der ersten Verarbeitung nur einmalig auftritt. Nach dem ersten Zyklus ändert sich die Partikelgrößenverteilung nicht messbar.

Diskussion: Dieser Effekt hat sich für die untersuchten Fälle bestätigt. Unter der Voraussetzung, dass die Prozessparameter (wie z. B. Beschichtungsgeschwindigkeit) nicht verändert werden, kann dieser Effekt nicht vermieden werden (prozessinhärent). Der Effekt betrifft die Gesamtmenge des Pulvers im Bauvolumen. Da der Effekt allerdings nur einmalig bei der ersten Verarbeitung auftritt, ergibt sich eine geringe Bedeutung für die Pulverqualität. Es gilt diesen Effekt bei der Analyse der Partikelgrößenverteilung der weiteren Proben aus dem aufgetragenen Pulver zu berücksichtigen.

### Spritzerbildung und -einbringung (Effekt SE)

Hypothese: Prozessspritzer werden aus dem Schmelzbad geschleudert und landen zum Teil im Pulverbett. Die Prozessspritzer weichen in ihren Eigenschaften vom Ausgangspulver ab, so dass deren Einbringung den Gesamtzustand des wiederzuverwendenden Pulvers verändert. Die Spritzer können sich hinsichtlich Partikelgrößenverteilung und -form sowie der Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente vom Ausgangszustand unterscheiden.

Ergebnisse Partikelgrößenverteilung: Die Partikelgrößenverteilung der gesiebten Spritzer (Position 3) im Vergleich zum Ausgangszustand ist in Abbildung 24 aufgetragen.



*Abbildung 24: Partikelgrößenverteilung der isolierten und gesiebten Prozessspritzer im Vergleich zum Ausgangszustand für die drei ausgewählten Werkstoffe, gemessen mittels Laserbeugung. Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messmethode*

Es zeigt sich, dass die Prozessspritzer bei allen drei Werkstoffen deutlich größer ausfallen als das Ausgangspulver. Die charakteristischen Perzentile der Spritzer fallen zwischen 9 % und 39 % höher aus als beim Neupulver. Gleichzeitig besteht ein großer Überschneidungsbereich der Verteilungen, auch unterhalb der typischen Siebmaschenweite zwischen 63 µm und 80 µm. Eine Einbringung von Prozessspritzern in das Pulverbett resultiert daher in der Vergrößerung des wiederverwendeten Pulvers.

Ergebnisse nichtmetallische Oberflächenelemente: Die Messergebnisse zu den chemischen Reaktionsprodukten zwischen den Restgasen in der Schutzgasatmosphäre und den Prozessspritzern (Position 3) sind in Abbildung 25 gezeigt.

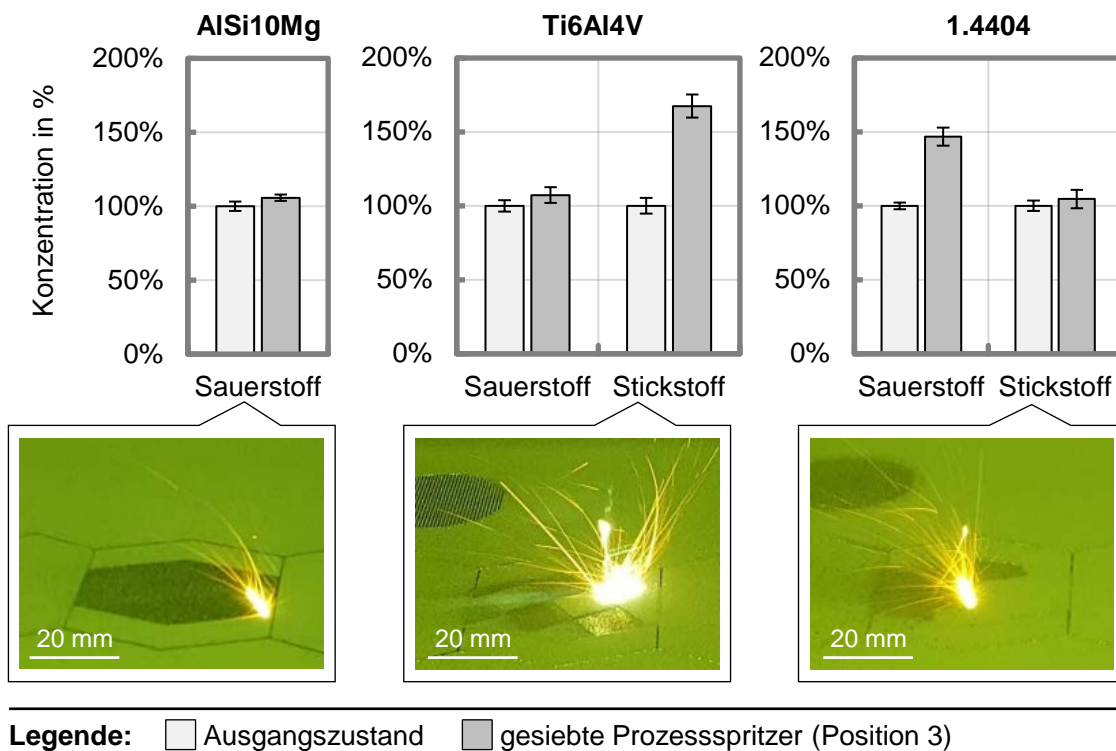


Abbildung 25: Oben: Sauerstoff- und Stickstoffgehalt der gesiebten Prozessspritzer (Position 3) im Vergleich zum Ausgangszustand, gemessen mittels Heißgasextraktion, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messung ( $n = 5$ ); unten: Spritzerbildung bei der Belichtung der Referenzbaujobs

Beim AlSi10Mg ergibt sich eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts um 6 %. Beim Ti6Al4V zeigt sich eine starke Zunahme des Stickstoffgehalts um 67 %. Auch der

Sauerstoffgehalt in den Prozessspritzern beim Ti6Al4V liegt um 7 % höher als im Ausgangszustand. Bei den Prozessspritzern aus der Verarbeitung des Edelstahls zeigt sich ein deutlich um 47 % erhöhter Sauerstoffgehalt. Der Stickstoffgehalt nimmt ebenso zu, aber mit einer geringeren Änderung.

Ergebnisse Partikelform: Die Partikelform der gesiebten Prozessspritzer zeigt sich in Abbildung 26. Zur Veranschaulichung sind zusätzlich die ungesiebten Prozessspritzer abgebildet.

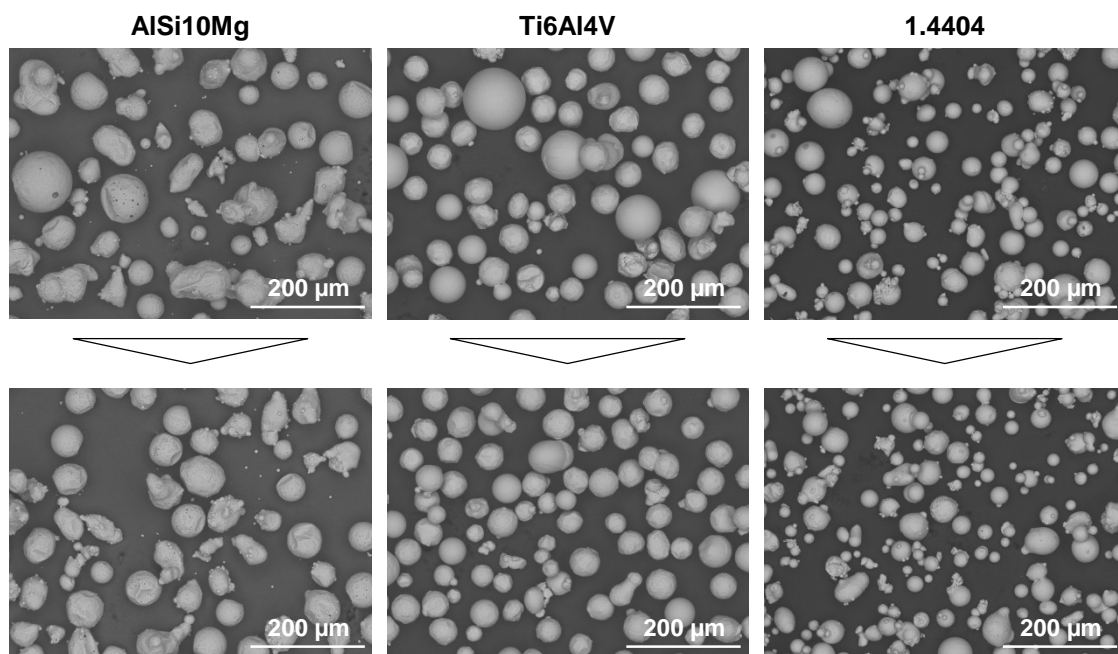


Abbildung 26: Partikelform der ungesiebten (oben) und gesiebten (unten) Prozessspritzer der drei Werkstoffe, REM-Aufnahmen ( $U = 15 \text{ kV}$ , BSE-Sensor)

In den ungesiebten Proben zeigen sich vereinzelt sehr große Partikel. Diese sind zum Teil äußerst sphärisch oder bilden ein Agglomerat aus mehreren verbundenen Partikeln. Beide Typen werden durch das Sieben entfernt. Die gesiebten Proben entsprechen in ihrer qualitativen Morphologie dem Ausgangszustand. Allein beim AlSi10Mg ist eine Änderung hin zu mehr sphärischen Partikeln zu erkennen. Für weiterführende und detailliertere Untersuchungen zu Prozessspritzern beim AlSi10Mg wird auf LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018A) verwiesen.

Diskussion: Es kann festgehalten werden, dass sich die Prozessspritzer bei allen drei Werkstoffen in ihrer Partikelgrößenverteilung und der Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente wesentlich vom Ausgangspulver

---

unterscheiden. Die Partikelform ändert sich nur beim AlSi10Mg geringfügig. Dieser Änderungseffekt hat sich demnach bestätigt. Obwohl bei der Aluminium- und der Titanlegierung der Sauerstoffgehalt des verwendeten Ausgangspulvers mit  $1.624 \pm 64$  ppm und  $2.081 \pm 65$  ppm bereits vergleichsweise hoch ausfällt, zeigen die gesiebten Prozessspritzer trotzdem noch höhere Sauerstoffgehalte. Die Bildung und Einbringung von Prozessspritzern ist prozessinhärent und kann aktuell nicht vermieden werden. Die betroffene Pulvermenge besteht aus den entstehenden Spritzern, die im Pulverbett und im Bauraum neben der Baufläche verbleiben. In LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018A) zeigt sich, dass diese am Beispiel von AlSi10Mg ca. 16 % der verfestigten Bauteilmasse ausmachen. Ein weiterer Teil wird durch den Schutzgasstrom abgesaugt und bleibt im Filter zurück. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass rund die Hälfte der Spritzer (50 % bis 57 % beim AlSi10Mg) beim Sieben mit Maschenweite 75  $\mu\text{m}$  nicht entfernt wird.

### **Versintern von Pulverpartikeln in bauteilnahen Bereichen (Effekt VB)**

Hypothese: Im Prozess erfährt das Pulver eine erhöhte Wärmeeinwirkung durch die Kombination aus Bauraumheizung, abgestrahlter Wärme des verfestigten Bauteils sowie durch Streustrahlung des Lasers. Vor allem in unmittelbarer Nähe des Bauteils (bauteilnaher Bereich) resultieren kurzzeitig hohe Temperaturniveaus, die zum Versintern von angrenzenden Pulverpartikeln oder zur Reaktion mit der Atmosphäre führen können. Dadurch können die Partikelgrößenverteilung, die Partikelform und die Konzentration nichtmetallischer Legierungselemente des Pulvers beeinflusst werden.

Ergebnisse Partikelgrößenverteilung: Abbildung 27 zeigt die Partikelgrößenverteilung der gesiebten Proben aus der Lamellengeometrie (Position 4). Aufgrund der geringen Probenmenge wurde diese mittels der REM-Partikelgrößenanalyse charakterisiert. Da sich bereits gezeigt hat, dass sich das Pulver im Pulverbett durch das Aufziehen im Vergleich zum Ausgangszustand verändert, wird als Referenz das aufgezogene Pulver im Pulverbett (Position 1) verwendet. Es zeigt sich bei den drei Werkstoffen ein unterschiedliches Verhalten. Beim AlSi10Mg stellt sich eine leichte Vergrößerung ein, die über alle Bereiche der Partikelgrößenverteilung zu erkennen ist. Beim Ti6Al4V unterscheidet sich allein der  $d_{90}$ -Durchmesser, der bei der Probe aus der Lamellenbox geringer ausfällt als bei der Referenzprobe. Beim Edelstahl ergeben sich keine Änderungen, die über die Ungenauigkeit der Messmethode hinausgehen.

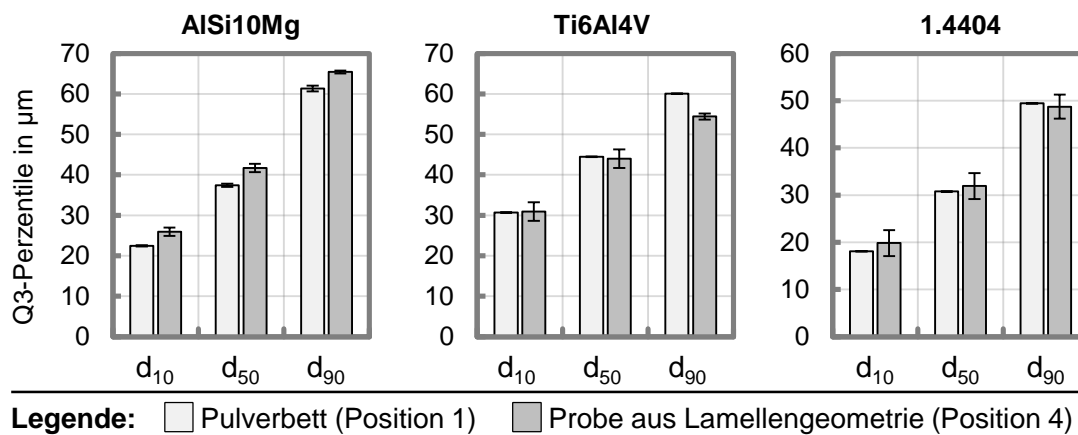


Abbildung 27: Partikelgrößenverteilung des gesiebten Pulvers aus der Lamellengeometrie, Messung des Ausgangszustands mittels Laserbeugung, Messung des Pulver aus der Lamellengeometrie mittels REM-Partikelgrößenanalyse, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messmethode

Ergebnisse Partikelform: Die Morphologie der gesiebten Proben aus der Lamellengeometrie ist in Abbildung 28 zusammengestellt. Die Form der Partikel zeigt qualitativ betrachtet keine Veränderung im Vergleich zum Ausgangszustand in Abbildung 20.

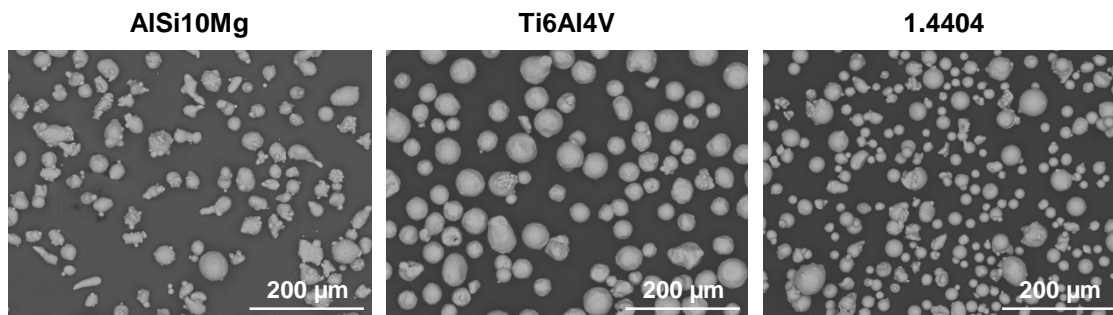


Abbildung 28: Partikelform der Proben aus der Lamellengeometrie, REM-Aufnahmen ( $U = 15 \text{ kV}$ , BSE-Sensor)

Bei allen Pulverproben sind Partikelpaare zu erkennen, die sich berühren und daher versintert sein könnten. Da es sich allerdings auch um eine Berührung ohne Stoffschluss handeln könnte, ist dies aus den Aufnahmen nicht eindeutig zu bestimmen.

Ergebnisse nichtmetallische Oberflächenelemente: Die Änderung der für die jeweiligen Werkstoffe relevanten Elementgehalte, die durch die Wärmeeinwirkung in bauteilnahen Bereichen und damit verbundene Reaktionen mit der Restatmosphäre entstehen kann, wird in Abbildung 29 dargestellt.

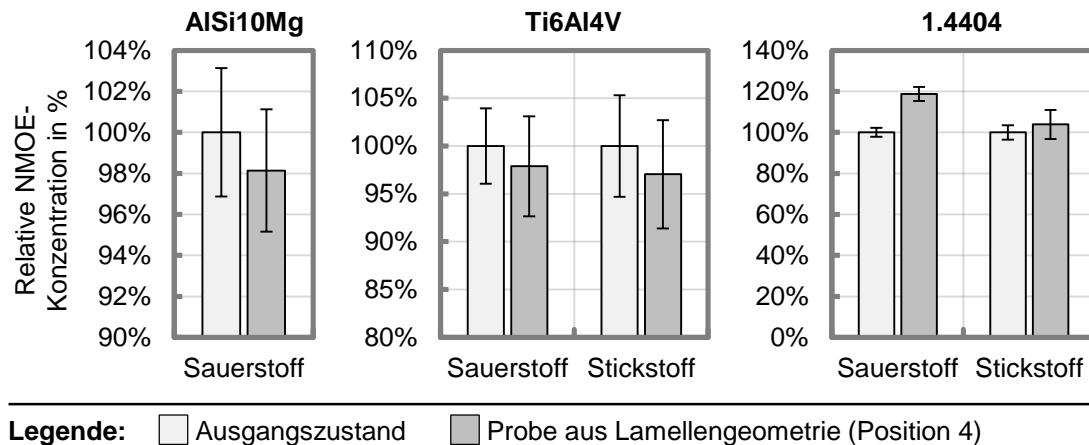


Abbildung 29: Sauerstoff- und Stickstoffgehalt der gesiebten Pulverproben aus der Lamellengeometrie im Vergleich zum Ausgangszustand, gemessen mittels Heißgasextraktion, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messung ( $n = 5$ )

Bei AlSi10Mg und Ti6Al4V ergeben sich keine relevanten Veränderungen. Allein beim Edelstahl steigt der Sauerstoffgehalt um 19 % an. Dies deutet auf eine Oxidation durch die erhöhte Wärmeeinwirkung innerhalb der Lamellengeometrie hin.

Diskussion: Insgesamt zeigt sich in den bauteilnahen Bereichen nur beim AlSi10Mg eine leichte Vergrößerung des Pulvers durch Agglomeration. Dies könnte an der geringen Schmelztemperatur dieses Werkstoffs und der entsprechend niedrigen Sintertemperatur liegen. Während sich bei AlSi10Mg und Ti6Al4V keine chemische Änderung einstellt, zeigt sich beim Edelstahl 1.4404 eine Oxidation. Auch dieser Effekt ist prozessinhärent und damit nicht vermeidbar. Er hängt von den Prozessparametern und der Bauteilgeometrie ab, die nicht verändert werden können. Aufgrund der geringen thermischen Leitfähigkeit des Pulverbetts sind nur Partikel direkt an der Bauteiloberfläche betroffen. Die beeinflusste Pulvermenge hängt von der Bauteilgeometrie ab, macht allerdings nur einen Bruchteil der Pulvermasse im Pulverbett aus und kann daher in seiner Bedeutung als gering bewertet werden. Auch SEYDA (2018) geht von einem Einwirkungsbereich von maximal 1 mm im Abstand zur Bauteiloberfläche aus. Da sich nur geringe

Änderungen des Pulvers zeigen, wird dem Effekt eine geringe Wirkung auf den Zustand des Gesamtpulvers zugeordnet.

### Thermisch induzierte Oberflächenreaktion des Pulverbetts (Effekt TO)

Hypothese: Das Pulverbett wird durch die Bauraumheizung erwärmt. Dadurch kann es zu thermisch induzierten Oberflächenreaktionen zwischen dem Pulver und den Reststoffen in der umgebenden Schutzgasatmosphäre kommen. Durch diesen Effekt kann die Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente beeinflusst werden.

Ergebnisse nichtmetallische Oberflächenelemente: Die Änderung der für die jeweiligen Werkstoffe relevanten Elementgehalte ist in Abbildung 30 aufgetragen.

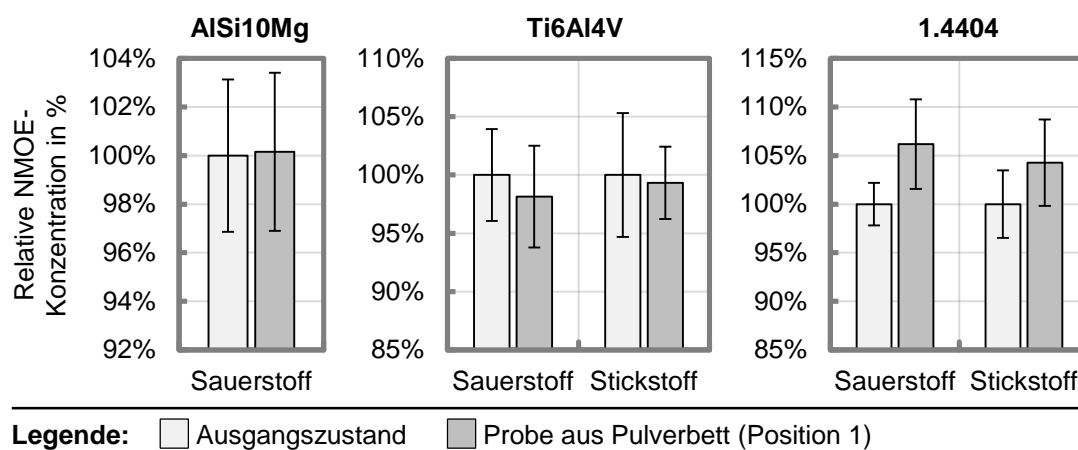


Abbildung 30: Sauerstoff- und Stickstoffgehalt der Pulverprobe aus dem unbeeinflussten Pulverbett im Vergleich zum Ausgangszustand, gemessen mittels Heißgasextraktion, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messung ( $n = 5$ )

Beim AlSi10Mg und Ti6Al4V zeigen sich keine statistisch signifikanten Änderungen der NMOE-Konzentrationen. Der Sauerstoffgehalt im Edelpulver steigt mit einer Zunahme um 6,2 % am stärksten an. Aufgrund der Genauigkeit der Messmethode kann hier allerdings keine klare Änderung festgestellt werden. Die Streuung der Sauerstoffmessungen wird durch das Messverfahren bedingt und liegt mit Standardabweichungen bis zu 5 % im zu erwartenden Bereich (ZÜHLKE ET AL. 2017).

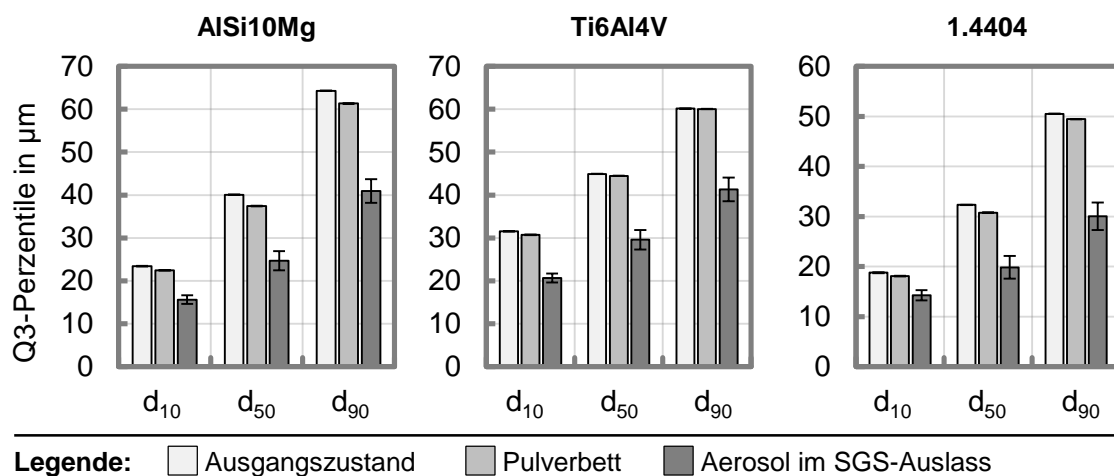
Diskussion: Der Effekt hat sich für die betrachteten Fälle nicht bestätigt. Ohne weitere Einflüsse verändert sich das Pulver im Pulverbett also trotz der herrschenden Vorheiztemperatur nicht.



## Aerosolbildung durch Schutzgasstrom (Effekt AS)

Hypothese: Durch den Schutzgasstrom, der während des Baujobs über das Pulverbett streicht, werden Partikel aus der obersten Schicht des Pulverbetts getragen und als Aerosol im Schutzgasstrom zum Auslass transportiert. Dadurch kann die Partikelgrößenverteilung des Pulvers im Pulverbett beeinflusst werden.

Ergebnisse Partikelgrößenverteilung: Abbildung 31 zeigt die Partikelgrößenverteilung des Aerosols im Vergleich zum Ausgangszustand. Weiterhin ist das im Pulverbett zurückbleibende Pulver aufgeführt.



*Abbildung 31: Partikelgrößenverteilung des Aerosols im Vergleich zum Ausgangszustand und Probe aus dem Pulverbett, Ausgangszustand und Pulverbett gemessen mittels Laserbeugung, Aerosol gemessen mittels REM-Partikelgrößenanalyse, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messmethoden*

Im Schutzgasstrom-Auslass kann ein Aerosol nachgewiesen werden, das sich bei allen drei Pulvern bildet und deutlich feiner ausfällt als das Ausgangspulver (um 16 % bis 39 % in den charakteristischen Perzentilen). Die Werte für das Pulverbett zeigen allerdings, dass sich dadurch keine Vergrößerung des im Pulverbett verbleibenden Pulvers einstellt. Der Effekt der Verfeinerung aus der Deagglomeration beim Beschichten (vgl. Abbildung 22) dominiert das Verhalten, so dass sich insgesamt eine Verfeinerung im Pulverbett einstellt.

Diskussion: Es zeigt sich, dass der Abtrag eines Aerosols für alle drei Werkstoffe auftritt, auch wenn keine Belichtung stattfindet. Aus der Partikelgrößenverteilung im Pulverbett kann jedoch geschlossen werden, dass die Aerosolmasse im

Vergleich zur Pulverbettmasse extrem gering sein muss. Auch dieser Effekt ist prozessinhärent und demnach nicht vermeidbar.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich vier der fünf hypothetischen Änderungseffekte während des LBM-Prozesses grundsätzlich bestätigt haben (DB, SE, VB, AS). Diese weisen zum Teil eine signifikante Wirkung auf die laut Normung qualitätsrelevanten Pulvereigenschaften (vgl. Abschnitt 2.3.1) auf, wie beispielsweise die Einbringung von Prozessspritzern (SE). Die Bedeutung anderer Effekte fällt sehr gering aus, wie beispielsweise die Aerosolbildung durch den Schutzgasstrom (AS). Unter der Voraussetzung, dass Prozessparameter vorgegeben sind und somit nicht verändert werden können, sind diese Effekte prozessinhärent und nicht zu vermeiden.

### 4.2.2 Effekte bei der Lagerung und Handhabung

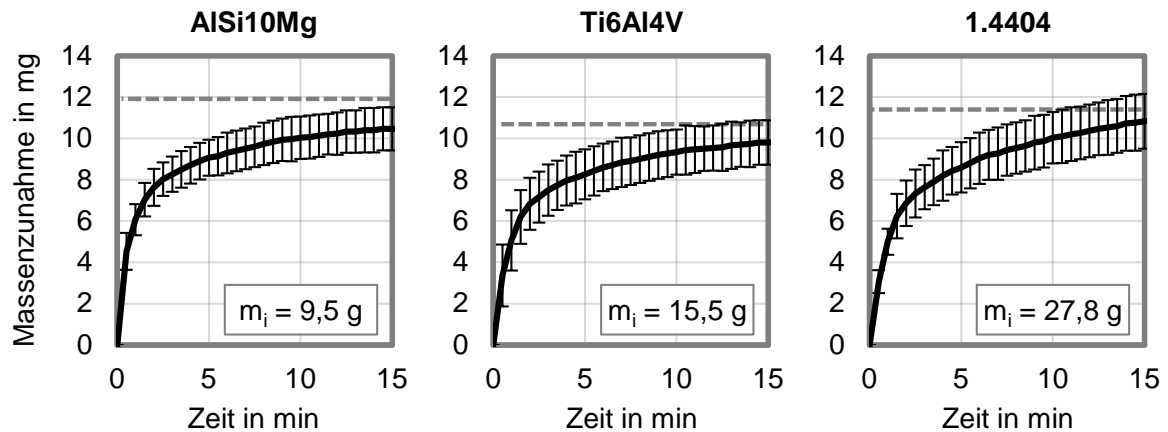
In diesem Unterabschnitt werden die Versuche zur Untersuchung der hypothetischen Änderungseffekte während der Lagerung und Handhabung des Pulvers beschrieben. Analog zum Unterabschnitt 4.2.1 werden die einzelnen Effekte jeweils hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Pulverqualität und somit für die Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen diskutiert. Das experimentelle Vorgehen zur Analyse der Einzeleffekte wird in den folgenden Unterabschnitten einzeln beschrieben.

#### **Adsorption von Feuchtigkeit (Effekt AF)**

Hypothese: Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft lagert sich je nach Atmosphäre (Temperatur, Luftfeuchte) und in Abhängigkeit der Kontaktdauer auf der Pulveroberfläche ab. Dadurch wird der Feuchtegehalt des Pulvers beeinflusst.

Versuchsbeschreibung: Zur Messung der Aufnahme von Umgebungsfeuchtigkeit wird das Pulver im ersten Schritt auf 160 °C erhitzt, so dass sämtliches Wasser aus der Probe verdampfen. Anschließend wird die Massenzunahme über die Zeit unter typischen Umgebungsbedingungen ermittelt. Zur Trocknung des Pulvers wird ein Feuchtebestimmer (Typ MA100, Firma Sartorius) verwendet. Die anschließende Massenzunahme wird mit einer Präzisionswaage (Typ ME104, Firma Mettler-Toledo) gemessen. Es wird ein gängiges Raumklima mit einer Umgebungstemperatur von  $24 \pm 2$  °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $31 \pm 2$  % gewählt. Es werden Pulverproben mit einem Volumen von 7 cm<sup>3</sup> verwendet, die in eine flache Schale gefüllt werden.

Ergebnisse Feuchteaufnahme: Die Verläufe der Massenzunahmen der drei Referenzpulver nach der Trocknung ist Abbildung 32 aufgetragen. Die Probenmenge von 7 cm<sup>3</sup> ergibt aufgrund der unterschiedlichen Dichten werkstoffspezifische initiale Probenmassen.



**Legende:** --- Ausgangszustand (vor der Trocknung)  $m_i$ : Initiale Probenmasse

*Abbildung 32: Massenzunahme der Pulverproben nach Trocknung bei 160 °C für 5 min, Messung mittels Feinwaage, Umgebungstemperatur =  $24 \pm 2$  °C, relative Luftfeuchtigkeit  $31 \pm 2$  %, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Durchläufe ( $n = 3$ )*

Es zeigt sich, dass die Masse bei allen drei Werkstoffen direkt nach der Trocknung innerhalb weniger Minuten um ca. 8 mg bis 12 mg zunimmt. Die Massendifferenz nach 15 min entspricht einem Feuchtegehalt (im Vergleich zum getrockneten Zustand) von 0,11 % bzw. 1100 ppm beim AlSi10Mg, 0,06 % bzw. 630 ppm beim Ti6Al4V und 0,04 % bzw. 390 ppm beim Edelstahl 1.4404. Es fällt auf, dass die Massezunahmen trotz der unterschiedlichen initialen Probenmassen für die drei Referenzpulver sehr ähnlich ausfallen. Dies deutet darauf hin, dass die Feuchtezunahme direkt mit dem Volumen zusammenhängt.

Diskussion: Es zeigt sich, dass unter gängigen Umgebungsbedingungen eine gewisse Menge an Umgebungsfeuchte an der Oberfläche des Pulvers adsorbiert wird. Der Änderungseffekt der Feuchteaufnahme wurde für die betrachteten Werkstoffe also bestätigt. Der genaue Einfluss der Umgebungsbedingungen bei diesem Effekt bleibt unklar. Es ist davon auszugehen, dass die Kontaktfläche mit der Umgebung bzw. die Behältergeometrie einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Änderung des Gesamtpulverzustands aufweist. Im Hinblick auf die

Vermeidbarkeit dieses Effektes gilt es zu berücksichtigen, dass die relative Luftfeuchte innerhalb des Lagerbehälters durch Zugabe eines Trocknungsbeutels bei nahezu 0 % gehalten werden kann. Ein entsprechender experimenteller Nachweis findet sich im Anhang (vgl. Anhang A4). Mit dieser einfachen Maßnahme kann somit eine langfristige Lagerung ohne Feuchtigkeitssorption gewährleistet werden.

#### Reaktion mit Umgebungsatmosphäre (Effekt RU)

Hypothese: Beim Kontakt mit der Umgebungsatmosphäre (ohne Schutzgas) bildet sich durch chemische Reaktion der Umgebungsfeuchte mit der Partikeloberfläche ein Reaktionsprodukt, das die chemische Zusammensetzung der Pulveroberfläche verändert. Dadurch wird der Wasserstoffgehalt des Pulvers beeinflusst.

Versuchsbeschreibung: Für die Untersuchung wird ein vollfaktorieller, zweistufiger Versuchsplan mit den Faktoren Temperatur, Luftfeuchte und Kontaktdauer verwendet. Durch die vollfaktorielle Variation werden auch Wechselwirkungen zwischen diesen Einflussgrößen berücksichtigt. Für die auftretenden Bedingungen werden typische Klimawerte für die industrielle Praxis verwendet. Abbildung 33 zeigt den entsprechenden Versuchsplan.

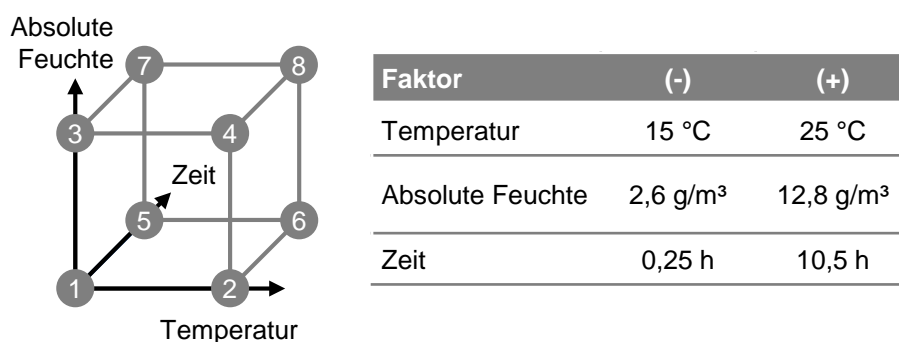


Abbildung 33: Vollfaktorieller Versuchsplan für die Reaktion der Pulverwerkstoffe mit Umgebungsfeuchtigkeit

Die Temperatur wird zwischen 15 °C und 25 °C gewählt, was gängigen Bedingungen in Produktionsbereichen entspricht. Um die Voraussetzung der Orthogonalität des Versuchsplans zu erfüllen, müssen die Faktoren unabhängig voneinander sein. Daher wird statt der relativen die absolute Feuchte genutzt, die nicht von der Temperatur abhängt. Es soll das maximale Spektrum der Feuchtigkeit abgedeckt werden. Durch den Klimaschrank ist eine Untergrenze von 10 %

Luftfeuchte vorgegeben. Dies entspricht bei 25 °C einer absoluten Feuchte von 2,6 g/cm<sup>3</sup>. Bei 15 °C entspricht das Maximum von 100 % relativer Luftfeuchte einer absoluten Luftfeuchte von 12,8 g/cm<sup>3</sup>. Die Untergrenze für die Handhabungszeit ergibt sich aus der minimalen Handhabungsdauer des Pulvers außerhalb der Schutzgasatmosphäre. Diese entspricht bei einmaligem Umfüllen in den Anlagentank vor dem ersten Baujob einer Zeitspanne von ca. 15 min. Die maximale Handhabungsdauer wird berechnet aus einer zusätzlichen mittleren Handhabedauer in Umgebungsatmosphäre von 20 min pro Zyklus über 30 Nutzungszyklen und einem weiteren Umfüllvorgang zu 630 min bzw. 10,5 Stunden.

Ergebnisse Wasserstoffgehalt: Die Wasserstoffgehalte der Proben aus dem Versuchsplan sind in Abbildung 34 zusammengefasst. Entscheidend für einen Nachweis der chemischen Reaktion sind die Proben, deren Werte sich über die 1-Sigma-Standardabweichung der Messungen hinaus vom Ausgangswert unterscheiden. Diese sind in der schematischen Faktorenübersicht dunkel hervorgehoben.

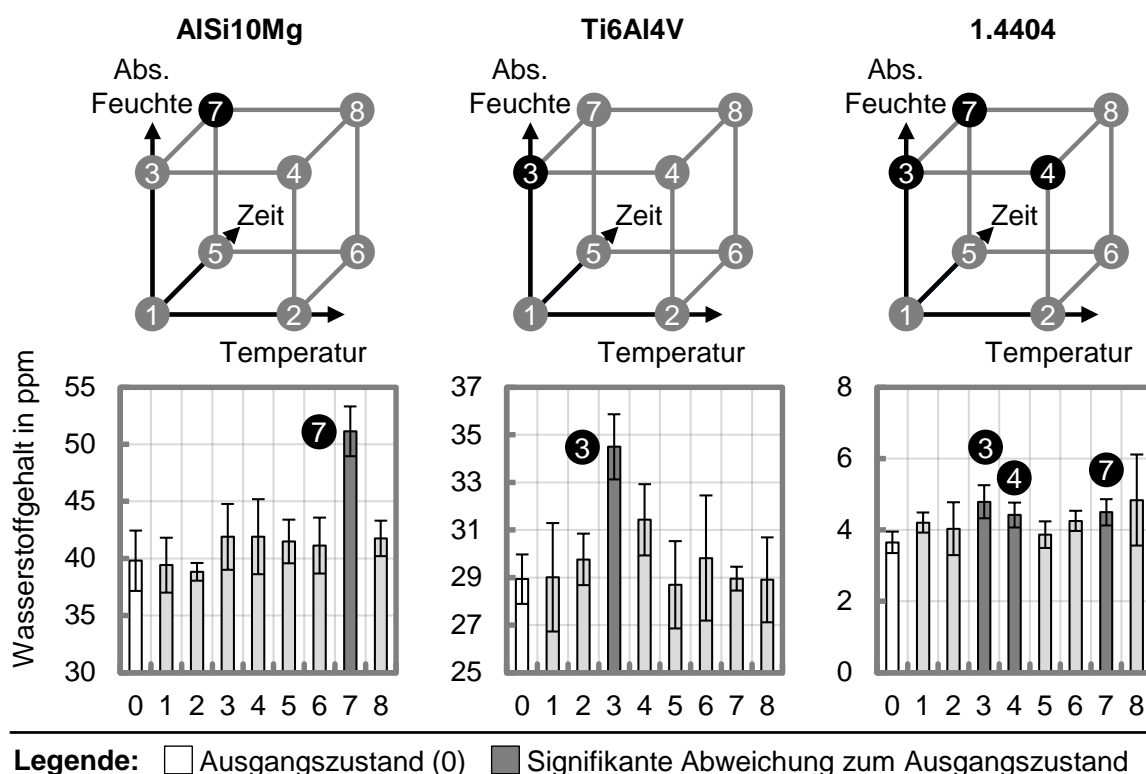


Abbildung 34: Wasserstoffgehalt der ausgelagerten Pulverproben der drei Werkstoffe, gemessen mittels Heißgasextraktion, Fehlerindikator:  $\pm$  1-Sigma-Standardabweichung der Messungen ( $n = 5$ )

Insgesamt zeigen sich vereinzelt Anstiege des Wasserstoffgehalts bei den drei Pulvermaterialien. Der Wasserstoffgehalt im AlSi10Mg-Pulver zeigt einen starken Ausschlag bei hoher absoluter Feuchte, geringer Temperatur und langer Lagerdauer (Probe 7). Bei dieser Probe kann anhand von REM-Aufnahmen das Phänomen der Bildung mikroskopischer Kristalle auf der Partikeloberfläche beobachtet werden. Dies deutet auf die Bildung von Aluminiumhydroxiden hin. Beim Ti6Al4V ergibt sich ein Anstieg bei hoher absoluter Feuchte, geringer Temperatur und geringer Kontaktdauer ( $34,5 \pm 1,4$  ppm). Beim Edelstahl liegen drei Zustände im Bereich eines signifikanten Wasserstoffanstiegs, bei dem sich die Mittelwerte der Proben über die 1-Sigma-Standardabweichungen der Messwerte hinaus unterscheiden. Die absoluten Unterschiede fallen hierbei mit maximal 1,2 ppm jedoch sehr gering aus. Es deutet sich an, dass eine hohe absolute Feuchte und einer geringe Temperatur die Wasserstoffreaktionen begünstigen. Diese Kombination entspricht einer hohen relativen Feuchte.

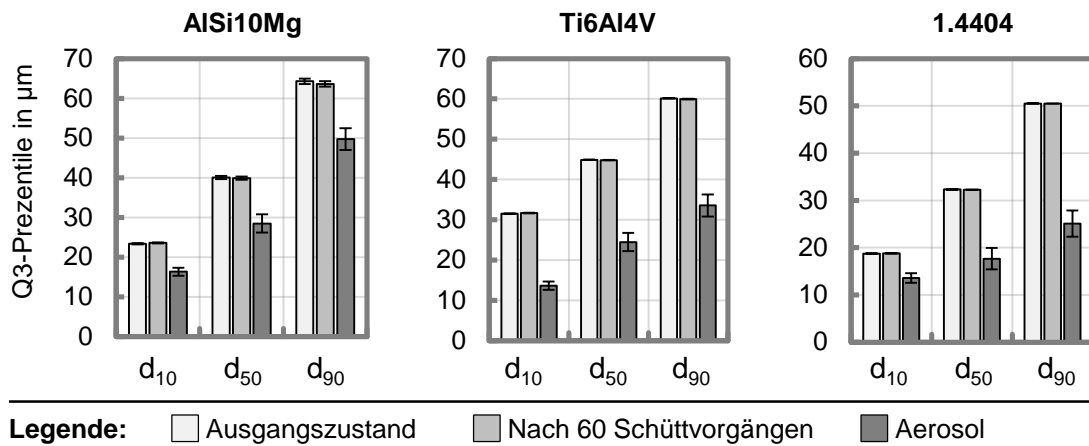
Diskussion: Insgesamt konnte ein Anstieg des Wasserstoffgehalts aufgrund der Umgebungsbedingungen nachgewiesen werden, der auf eine chemische Reaktion an der Partikeloberfläche zurückzuführen ist (v. a. bei AlSi10Mg). Bei geringer Umgebungsfeuchte wird der Anstieg jedoch gänzlich vermieden. Im Hinblick auf die Vermeidung des Effektes zeigt sich für diese Werkstoffe, dass bei niedrigen relativen Luftfeuchten mit keiner Änderung des Wasserstoffgehalts zu rechnen ist.

### **Aerosolbildung beim Umfüllen (Effekt AU)**

Hypothese: Partikel werden beim Schütten des Pulvers zwischen Behältern aufgewirbelt und daher beim Umfüllen in nicht gekapselten Systemen in die Umgebung abgegeben. Da das Aerosol vor allem aus feinen Partikeln besteht und diese damit vornehmlich aus dem Pulver verloren gehen, wird die Partikelgrößenverteilung beeinflusst.

Versuchsbeschreibung: Für die Untersuchung werden typische Pulverbehälter genutzt. Zum Sammeln der Partikel beim Schüttvorgang wird das Aerosol abgesaugt und auf einen selbstklebenden Probenträger geleitet. Durch diese Präparation können die Partikel anschließend mittels REM-Partikelgrößenanalyse charakterisiert werden. Neben dem Aerosol werden zusätzlich Proben aus dem verbleibenden Gesamtpulver nach 60 Schüttungen gemessen (entspricht ca. 30 Zyklen, 2 Schüttungen pro Zyklus). Als Hilfsmittel beim Umschütten wird ein Trichter verwendet.

Ergebnisse Partikelgrößenverteilung: Die Ergebnisse der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung des Aerosols, des Zustands nach 60 Schüttungen und des Ausgangszustands sind in Abbildung 35 aufgetragen.



*Abbildung 35: Partikelgrößenverteilung der Aerosole beim Schütten und des Restpulvers nach 60 Schüttvorgängen im Vergleich zum Ausgangszustand, Messung des Aerosols mittels REM-Partikelanalyse, sonstige Messungen mittels Laserbeugung, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messmethode*

Das entstehende Aerosol fällt für alle drei Werkstoffe deutlich feiner aus als das Ausgangspulver. Dies bestätigt die These, dass besonders die feinen Partikel beim Schütten der Pulver an die Umgebungsluft abgegeben werden. Allerdings ergibt sich für keines der drei Pulver eine nachweisliche Änderung der Partikelgrößenverteilung nach 60 Schüttvorgängen.

Diskussion: Der Effekt hat sich für die Anwendungsfälle bestätigt. Ein feines Aerosol wird während des Umfüllens in die Umgebung abgegeben. Die Partikelgrößenverteilung des Gesamtpulvers ändert sich allerdings wegen der geringen Aerosolmasse nicht. Es gilt zu beachten, dass der Effekt durch die Nutzung geschlossener Systeme beim Umfüllen relativ einfach zu verhindern ist. Entstehendes Aerosol beim freien Fließen und Rieseln des Pulvers kann in diesem Fall das System nicht verlassen und verbleibt im Gesamtpulver.

### Anhaftungen an Oberflächen (Effekt AO)

Hypothese: Beim dynamischen Kontakt des Pulvers mit Oberflächen (z. B. Behälter, Leitungen, Hilfsmittel) kommt es zu einer elektrostatischen Aufladung, die zu Anhaftungen bzw. Adhäsion des Pulvers an diesen Flächen führt. Dadurch wird die Partikelgrößenverteilung des nicht anhaftenden Pulvers beeinflusst werden.

Versuchsbeschreibung: Als Kontaktpartner wurden drei unterschiedliche Materialien gewählt, mit denen die Pulver bei der Referenzanwendung in Kontakt kommen. Dabei handelt es sich um einen Pulverbehälter aus Polyethylen (PE), ein Aluminiumrohr zur Förderung des Pulvers in der LBM-Anlage sowie ein Siebbehälter aus Edelstahl. Nach der Benetzung der Behälter durch Rotieren mit einer gleichbleibenden Pulvermenge wird das Pulver aus dem Behälter entnommen und hinsichtlich Partikelgrößenverteilung analysiert.

Ergebnisse Partikelgrößenverteilung: Die Ergebnisse der Analyse der Partikelgrößenverteilung für die Pulver nach Kontakt mit den drei Materialien sind in Abbildung 36 zusammengefasst.

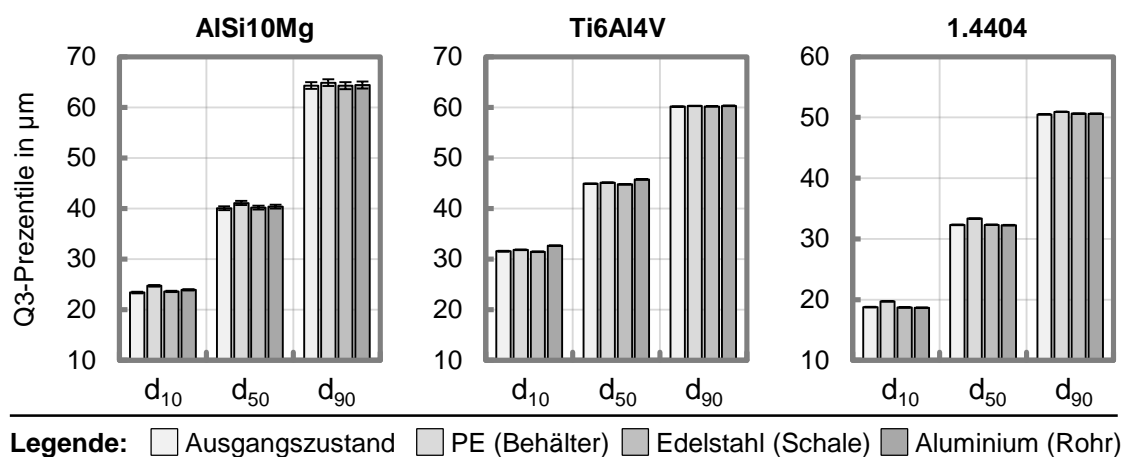


Abbildung 36: Partikelgrößenverteilung der Pulverzustände nach dem Kontakt mit den drei Oberflächen, gemessen mittels Laserbeugung,  
Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messmethode

Die Partikelgrößenverteilung der Pulverproben nach dem Kontakt mit allen drei Oberflächenarten unterscheidet sich nur geringfügig gegenüber dem Ausgangszustand. Am Behälter aus Polyethylen ist zu erkennen, dass so viele feine Partikel an der Oberfläche haften bleiben, dass sich eine leichte Vergrößerung einstellt.



---

Diskussion: Der Effekt konnte für die Oberfläche aus Polyethylen bestätigt werden. Es bleibt ein feiner Pulverrest auf der Behälteroberfläche zurück, so dass sich eine geringfügige Vergrößerung des restlichen Pulvers ergibt. Bei den Kontaktpartnern aus Aluminium und Edelstahl tritt der Effekt nicht messbar auf. Ein entsprechender Kontakt kommt nur zustande, wenn die Kontaktfläche noch nicht mit Pulver benetzt ist. Werden die Oberflächen nicht vor jedem Kontakt gereinigt, tritt dieser Effekt nur einmalig auf und kann folglich einfach vermieden werden.

### 4.3 Bewertung der Änderungseffekte

Abschließend können die Änderungseffekte im Kontext des Pulverrecyclings basierend auf der Analyse hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Qualitätssicherung kategorisiert werden. Die Vermeidbarkeit der Effekte spielt dabei eine zentrale Rolle. Da diese im Sinne der Qualitätssicherung ein wichtiges Ergebnis darstellen, werden die Erkenntnisse in einem eigenen Unterabschnitt als technische Maßnahmen formuliert.

#### 4.3.1 Vermeidbarkeit

Die Effekte im LBM-Prozess (DB, SE, VB, TO, AS) sind inhärent und können nicht vermieden werden ohne den Prozess selber zu ändern. Für die bestätigten Effekte bei der Handhabung und Lagerung (AF, RU, AU, AO) hat sich gezeigt, dass diese grundsätzlich vermieden werden können. Basierend auf den Erkenntnissen aus Unterabschnitt 4.2.2 können demnach Richtlinien abgeleitet werden, die das Auftreten dieser Änderungseffekte verhindern.

- **Adsorption von Feuchtigkeit:** Bei der Analyse dieses Effekts hat sich gezeigt, dass die Pulvermaterialien unter gängigen Umgebungsbedingungen Feuchtigkeit aus der Atmosphäre aufnehmen. Es zeigt sich, dass Feuchtigkeit grundsätzlich durch einen Trocknungsschritt aus dem Pulver entfernt werden kann. Der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf den Feuchtegehalt geht aus den durchgeführten Versuchen nicht hervor. Innerhalb von geschlossenen Systemen (z. B. Lagerbehälter) kann eine relative Luftfeuchte von 0 % relativ einfach durch die Zugabe von Trocknungsbeuteln (z. B. Kieselgel) realisiert werden. Alternativ kann eine durchgehende Schutzgasatmosphäre (z. B. Stickstoff, Argon) vorgesehen werden. Bei offenem Pulverhandling ist allgemein auf eine geringe relative Luftfeuchtigkeit zu achten, die durch eine

aktive Klimatisierung des Produktionsbereichs erreicht werden kann. Insgesamt kann dieser Effekt somit durch technische Maßnahmen vermieden werden.

- **Reaktion mit Umgebungsfeuchte:** Wird die Adsorption von Feuchtigkeit vermieden, kann es zu keiner entsprechenden Reaktion kommen. Werden die Bedingungen zur Vermeidung der Sorption von Feuchte eingehalten, so wird dieser Effekt mit verhindert. Unter anderem aus diesem Grund ist die Vermeidung der Feuchtesorption einer Trocknung von feuchtem Pulver vor dem LBM-Prozess vorzuziehen.
- **Aerosolbildung beim Umschütten:** Durch diesen Effekt gehen feine Partikelfractionen verloren. Diese weisen einen hohen alveolengängigen Partikelanteil gemäß DIN EN 481 sowie eine geringe erforderliche Zündenergie auf und sind daher auch für die Arbeitssicherheit von Bedeutung. Das Auftreten kann durch die Nutzung geschlossener Umfüllsysteme verhindert werden (z. B. Adapterschläuche, Einfüllstutzen oder Umfüllen innerhalb eines Handschuhkastens bzw. einer *Glovebox*).
- **Anhaftungen an Oberflächen:** Es zeigt sich für diesen Effekt, dass metallische Oberflächen deutlich weniger mit dem Pulver interagieren als Oberflächen aus Kunststoff und dass somit deutlich weniger Partikel haften bleiben. Neben der Verwendung von metallischen Werkstoffen für Behälter, Werkzeuge und Rohre kann der Effekt weiterhin dadurch verhindert werden, dass Oberflächen nicht vor jedem Kontakt gereinigt werden, wodurch eine Pulverschicht anhaftet, die eine Adhäsion weiterer Partikel verhindert.

Obwohl die Einbringung von Fremdpartikeln nicht als Änderungseffekt betrachtet wurde, gilt es diese Gefährdung für die Bauteilqualität nichtsdestotrotz bei den technischen Maßnahmen zu berücksichtigen. In diesem Sinne ist neben der bereits erwähnten Nutzung von geschlossenen Umfüllsystemen darauf zu achten, dass alle Objekte, mit denen das Pulver in Kontakt kommt, nur für einen spezifischen Werkstoff genutzt werden sollten. Dazu zählen beispielsweise Behälter, Trichter, Schaufeln, Pinsel, Spatel und Siebe.

### 4.3.2 Kategorisierung

Die Kategorisierung kann anhand der diskutierten Merkmale des Auftretens der Effekte, der Vermeidbarkeit sowie der Relevanz für die Pulverqualität vorgenommen werden. In der ersten Stufe wird unterschieden, ob der hypothetische Effekt experimentell bestätigt wurde. Im zweiten Schritt werden die übrigen Effekte

hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Pulverqualität beurteilt. Diese ergibt sich aus der Kombination der betroffenen Pulvermenge sowie dem Ausmaß der gemessenen Änderung. Im letzten Schritt wird differenziert, welche Effekte durch die Anwendung von technischen Maßnahmen vermieden werden können. Abbildung 37 zeigt die entsprechende Einordnung der neun Effekte für die in diesem Kapitel betrachtete Referenzanwendung.

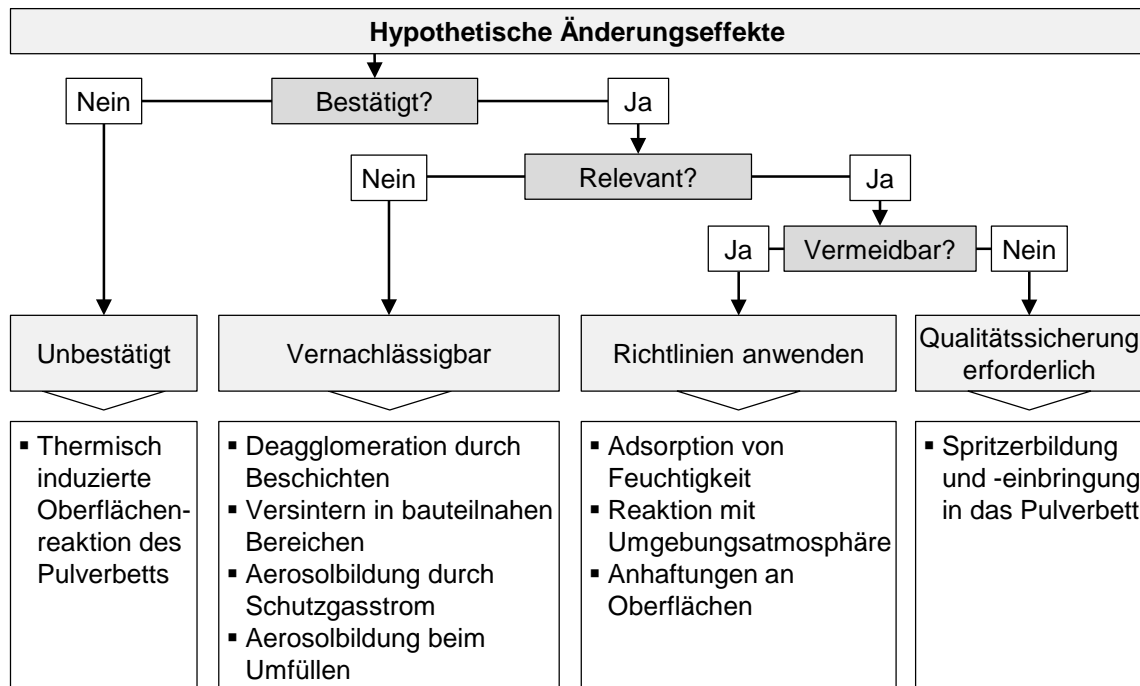


Abbildung 37: Kategorisierung zur Bewertung der hypothetischen Änderungseffekte für die betrachtete Referenzanwendung

Da die Ergebnisse für die betrachteten Materialien sehr ähnlich ausfallen, gilt die Kategorisierung für alle drei Werkstoffe. Es zeigt sich, dass für die betrachteten Werkstoffe nur der Effekt der thermisch induzierten Oberflächenreaktion des Pulverbetts (TO) nicht bestätigt wurde. Ein Teil der bestätigten und nicht vermeidbaren Effekte wurde als nicht relevant für die Pulverqualität bewertet. Der Effekt der Deagglomeration beim Schichten (DB) tritt nur einmalig auf und weist eine geringe Änderungsintensität auf. Die Effekte des Versinterns in bauteilnahen Bereichen (VB), der Aerosolbildung durch den Schutzgasstrom (AS) und der Aerosolbildung beim Umfüllen (AU) betreffen jeweils nur sehr geringe Pulvermengen und beeinflussen damit nicht wesentlich den Zustand des Gesamtpulvers. Drei der bestätigten und relevanten Effekte können durch die Anwendung technischer Maßnahmen vermieden werden. Allein der Effekt der

Spritzerbildung und -einbringung (SE) kann ohne Veränderungen am Prozess selbst nicht vermieden werden. Gerade die Wirkung dieses Effektes auf die Konzentration der nichtmetallischen Oberflächenelemente im Recyclingpulver kann dabei als Gefährdung für die Bauteilqualität bewertet werden. Daher ist das Auftreten dieses Änderungseffektes aus Sicht der Qualitätssicherung zu berücksichtigen.

### 4.4 Fazit

#### 4.4.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden neun hypothetische Änderungseffekte hergeleitet und für drei repräsentative Werkstoffe anhand einer Referenzanwendung experimentell analysiert. Anhand der Analyse der einzelnen Effekte konnte deren Verständnis verbessert und eine anschließende Bewertung hinsichtlich der Bedeutung für die Qualitätssicherung ermöglicht werden. Es wurden technische Maßnahmen bzw. Richtlinien abgeleitet, um die Änderungseffekte abseits des LBM-Prozesses (AF, RU, AU, AO) zu vermeiden. Die Effekte wurden hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen in vier Kategorien eingeteilt. Als Kriterien wurden das Auftreten, die Vermeidbarkeit sowie die Bedeutung für die Pulverqualität verwendet.

Die Erkenntnisse aus der experimentellen Analyse der Änderungseffekte tragen zum grundsätzlichen Verständnis der Effekte und deren Einflussgrößen bei. Es wurden technische Maßnahmen bzw. Richtlinien abgeleitet, die zur Sicherung der Pulverqualität in der industriellen Praxis beitragen können. Dazu zählen beispielsweise Vorgaben für die Lagerung und Handhabung der Pulvermaterialien. Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuche zu den einzelnen hypothetischen Änderungseffekten können auf weitere Materialien und Anwendungsfälle übertragen werden, um so ein noch weitreichenderes Verständnis der Einflüsse von Pulverrecycling auf die Pulverqualität zu erlangen.

Die Ergebnisse in diesem Kapitel sind konsistent mit den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und Technik. Die Analyse in dieser Arbeit ergänzt die erwähnten Vorarbeiten, da die Betrachtung auf eine detaillierte Ebene erweitert wird. Durch die Betrachtung der Einzeleffekte kann das beschriebene Alterungsverhalten erklärt werden. Die kontinuierliche Zunahme der NMOE-Konzentration kann mit der Einbringung von Prozessspritzern erklärt werden. Die besonders hohen NMOE-Konzentrationen in Prozessspritzern konnte für weitere

---

Werkstoffe nachgewiesen werden. Die Vergrößerung der Partikelgrößenverteilung kann als Überlagerung der Effekte SE, VB, AS, AU und AO erklärt werden, die jeweils eine Verschiebung der Größenverteilung bedingen. Bei der weiteren Verwendung der Ergebnisse sollte beachtet werden, dass keine Wechselwirkungen zwischen Effekten berücksichtigt wurden.

#### **4.4.2 Handlungsbedarf**

Im Hinblick auf ein qualitätsgesichertes Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen ergibt sich aus den Ergebnissen dieses Kapitels ein Handlungsbedarf. Es wurde mit der Einbringung von Prozessspritzern ein kritischer Effekt identifiziert, der sich ohne einen Eingriff in den Prozess nicht vermeiden lässt. Ein kontinuierlicher Anstieg von eingebrachtem Spritzerunterkorn bedingt eine sukzessive Veränderung der chemischen Zusammensetzung. Dieser sollte daher im Sinne eines qualitätsorientierten Pulverrecyclings berücksichtigt werden.

Theoretisch bieten die Modellierung dieses Effekts und die damit verbundene Prognose der NMOE-Konzentration im Pulver einen Lösungsansatz, um diesen Effekt effizient im Sinne der Qualitätssicherung berücksichtigen zu können. Dieser Ansatz wird daher in den folgenden Kapiteln verfolgt. Es wird sich dabei auf die Änderung des Pulverzustands durch Einbringen von Prozessspritzern konzentriert.



---

## 5 Modellierung der Zustandsänderung durch das Pulverrecycling

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass die Einbringung von Prozessspritzern aus Sicht der Qualitätssicherung einen relevanten Alterungseffekt beim Pulverrecycling darstellt. In diesem Kapitel wird ein diskretes numerisches Berechnungsmodell entwickelt, das die räumliche Verteilung entstehender Prozessspritzer und deren Einbringung in das Pulverbett beschreibt. Es soll dazu dienen, die Konzentration von eingebrachtem Spritzerunterkorn über die wiederholte Verarbeitung einer Pulvercharge zu prognostizieren. Das Modell soll als Werkzeug zur Qualitätssicherung beim Pulverrecycling dienen. Zur Entwicklung des Modells werden eingangs die Anforderungen festgelegt. Anschließend werden die Modellstruktur mit Baujob- und Pulverchargen-Ebene sowie das Vorgehen zur Kalibrierung erläutert. Abschließend wird das Modell anhand eines Anwendungsbeispiels hinsichtlich Plausibilität, Reproduzierbarkeit und Ergebnisgenauigkeit validiert.

### 5.1 Modellzweck und Anforderungen

Das Modell soll beschreiben, wie sich die Konzentration eingebrachter Prozessspritzer in einer Pulvercharge durch die Wiederverwendung über beliebige Baujobs verändert. Es soll eine quantitative Vorhersage des Anteils des eingebrachten Spritzerunterkorns in der Pulvercharge ermöglichen. Diese charakteristische Zustandsgröße wird als ESUK-Anteil bezeichnet. Ergänzend zu dem Zweck der Modellierung werden folgende Anforderungen an das Modell gestellt:

- **Flexibilität:** Das Modell soll so allgemein formuliert sein, dass es auf beliebige LBM-Anwendungsfälle anwendbar ist. Es sollte daher flexibel hinsichtlich der verwendeten Anlage, der Prozessparameter und des Werkstoffs sein.
- **Kalibrierbarkeit:** Das Modell soll durch ein kompaktes experimentelles Vorgehen für den jeweiligen Anwendungsfall kalibriert werden können. Das Ergebnis der Kalibrierung soll dabei reproduzierbar sein.
- **Effizienz:** Es wird ein möglichst geringer Aufwand bei der Kalibrierung und Anwendung des Modells bei gleichzeitig möglichst hoher Ergebnisgüte und Aussagekraft angestrebt.

Das Modell soll für LBM-Anlagen nach aktuellem Stand der Technik gültig sein (vgl. Unterabschnitt 2.2.1.3). Bei der Modellierung wird ausschließlich die Verarbeitung eines Werkstoffes (i.e. Monomaterialprozesses) betrachtet.

## 5.2 Übersicht der Modellebenen

Eine Übersicht des Aufbaus des Modells mitsamt der Eingabe- und Ausgabeinformationen geht aus Abbildung 38 hervor.

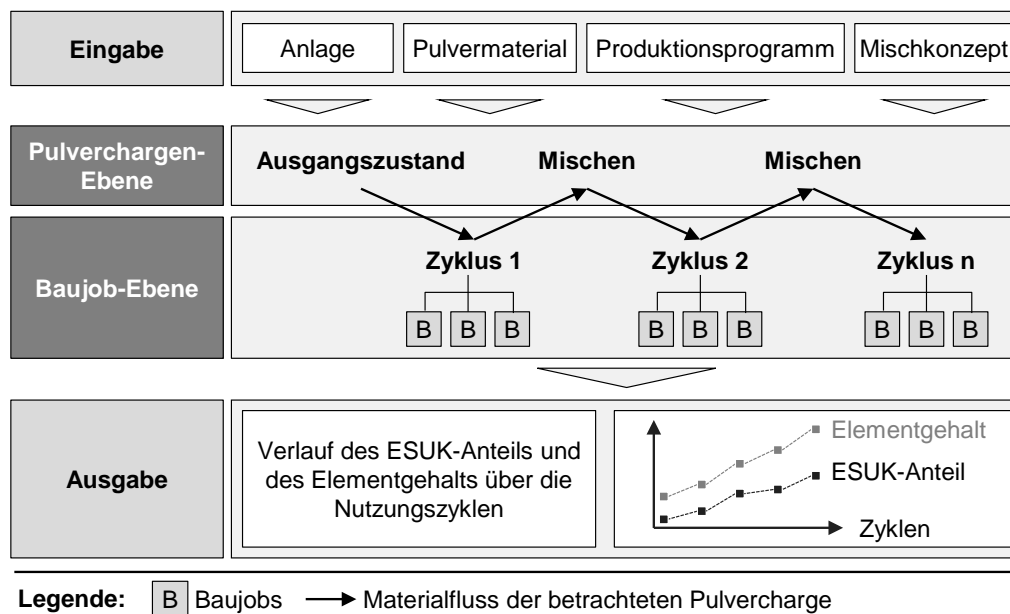


Abbildung 38: Aufbau des Berechnungsmodells zur Beschreibung der Zustandsänderung durch das Pulverrecycling

Input für die Modellierung stellen die genutzte LBM-Anlage, das Pulvermaterial, das geplante Produktionsprogramm sowie das Mischkonzept für das Recyclingpulver (vgl. Unterabschnitt 2.2.3) dar. Das Produktionsprogramm beeinflusst neben dem Verbrauch des Pulvers durch die Geometrie und die Anordnung der Bauteile auch die Menge der entstehenden und eingebrachten Prozessspritzer. Auf Pulverchargen-Ebene wird betrachtet, aus welchen Zuständen sich die Pulvercharge nach den geplanten Verarbeitungszyklen zusammensetzt und in welchem Verhältnis die einzelnen Pulverzustände gemischt werden. In einem Zyklus können dabei auch mehrere Baujobs gefertigt werden. Auf der Baujob-Ebene wird die Einbringung von Prozessspritzern in das Pulverbett und das Recyclingpulver des Baujobs beschrieben. Als Ergebnis liefert das Modell den Verlauf des Anteils eingebrachter Prozessspritzer sowie die dadurch beeinflusste



---

Konzentration der betrachteten nichtmetallischen Oberflächenelemente über die geplanten Verarbeitungszyklen der Pulvercharge. Auf beiden Betrachtungsebenen wird eine mathematische Modellierung genutzt. Das Modell kann sowohl deskriptiv für bestehende Anwendungsfälle und als auch präskriptiv für die Planung der LBM-Produktion eingesetzt werden.

### 5.3 Baujob-Ebene

Der Zweck dieses Teils des Modells besteht darin, die Menge der eingebrachten Prozessspritzer bei der Fertigung eines gegebenen Baujobs zu bestimmen. Es gilt zu beachten, dass das Recyclingpulver im Rahmen der Wiederaufbereitung gesiebt wird, um grobe Partikel zu entfernen. Für die Alterung des Pulvers ist daher ausschließlich das Unterkorn der Prozessspritzer relevant.

Die zu verfestigende Bauteilgeometrie bestimmt die Menge und den Entstehungsort der Prozessspritzer. Auch die Geometrie der Baufläche und der Baukammer spielen eine Rolle. Da je nach Pulverrecyclingstrategie das Recyclingpulver im Bauraum neben der Baufläche teilweise wiedergewonnen wird, wird das in diesem Bereich abgelagerte ESUK gesondert von dem im Pulverbett berücksichtigt.

Der schematische Materialfluss des Pulvers bei der Verarbeitung in einem Baujob wird in Abbildung 39 veranschaulicht. Dabei wird im Besonderen auf den Verbleib der entstehenden Spritzer eingegangen. Im Hinblick auf den Verbleib der entstehenden Spritzer können die folgenden vier Fälle unterschieden werden:

1. **Auf dem Bauteilquerschnitt:** Prozessspritzer, die auf dem bereits verfestigten Bauteil landen, werden in der nächsten Schicht verfestigt. Diese Spritzer gelangen somit nicht in das Recyclingpulver. Da die effektive Schichtdicke deutlich über dem maximalen Durchmesser des Spritzerunterkorns liegt, kann davon ausgegangen werden, dass diese Spritzer nicht vom Beschichter entfernt werden.
2. **Im Filtersystem:** Ein Teil der Spritzer wird durch den Schutzgasstrom abgesaugt und verbleibt somit im Filtersystem.
3. **Umgebende Baukammer:** Je nach Aufbau der Anlage können sich Spritzer im Bauraum neben der Baufläche sammeln. Diese Ablagerung kann je nach Pulverrecyclingstrategie entweder entfernt (z. B. abgesaugt) werden oder das Pulver wird beim Ausbauen wiedergewonnen, so dass das enthaltene Unterkorn nach dem Sieben in das Recyclingpulver gelangt.

4. **Im Pulverbett:** Landen die Spritzer in den Bereichen des Pulverbetts, die nicht verfestigt werden, gelangen diese in das Recyclingpulver.

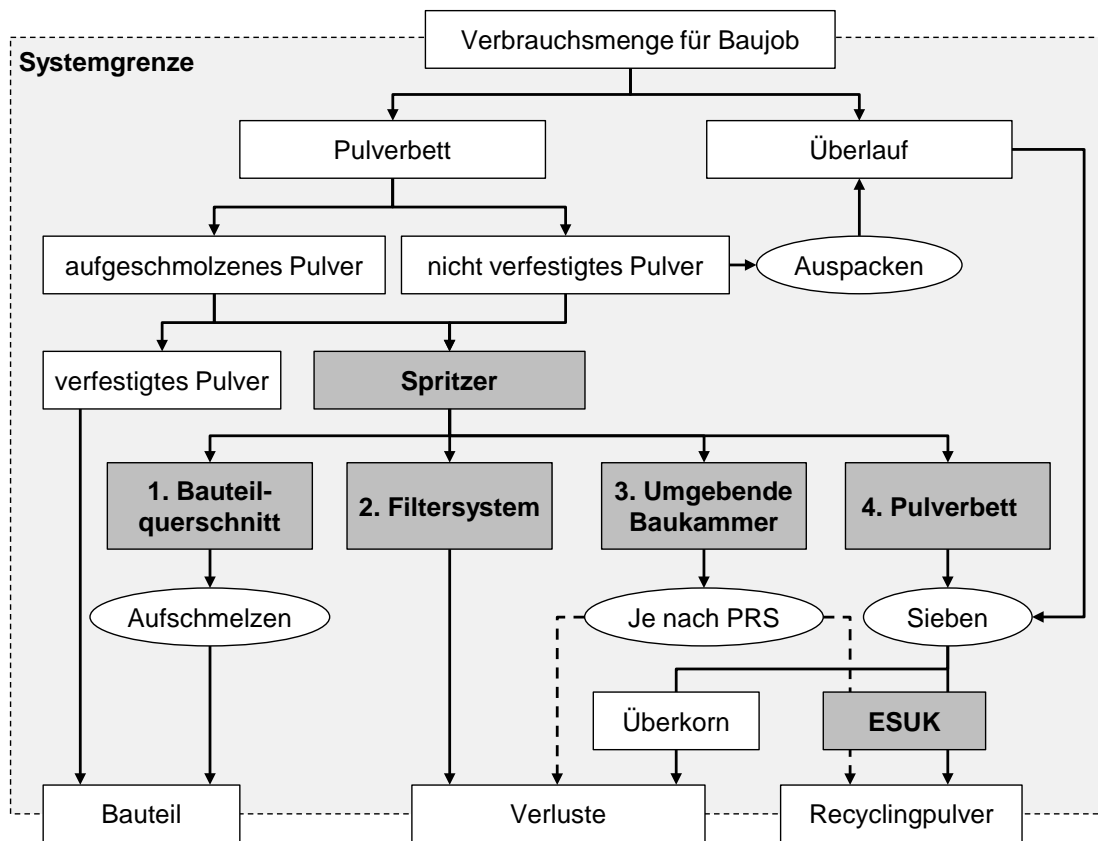


Abbildung 39: Materialfluss des Pulvers innerhalb eines Baujobs und des anschließende Siebenvorgangs

Für die Betrachtung des eingebrachten Spritzerunterkorns (ESUK) im Rahmen des Modells ist demnach der Fall 4 und je nach Pulverrecyclingstrategie (PRS) weiterhin der Fall 3 relevant. Diese bilden daher die Grundlage für den Aufbau des Modells.

### 5.3.1 Berechnungsansatz

Die Einbringung der Prozessspritzer kann grundsätzlich über ein räumliches Verteilungsprofil der Spritzer bestimmt werden. Es gilt als Einflussfaktoren den Entstehungsort der Spritzer, deren räumliches Verteilungsprofil, den Bauteilquerschnitt in der gegebenen Schicht sowie die Abmessungen des Bauraums zu berücksichtigen. Die schematische Verteilung der Spritzer, die an einem

inkrementellen Entstehungsort gebildet werden, und deren Einbringung auf der Baupflache und im restlichen Bauraum sind in Abbildung 40 veranschaulicht.

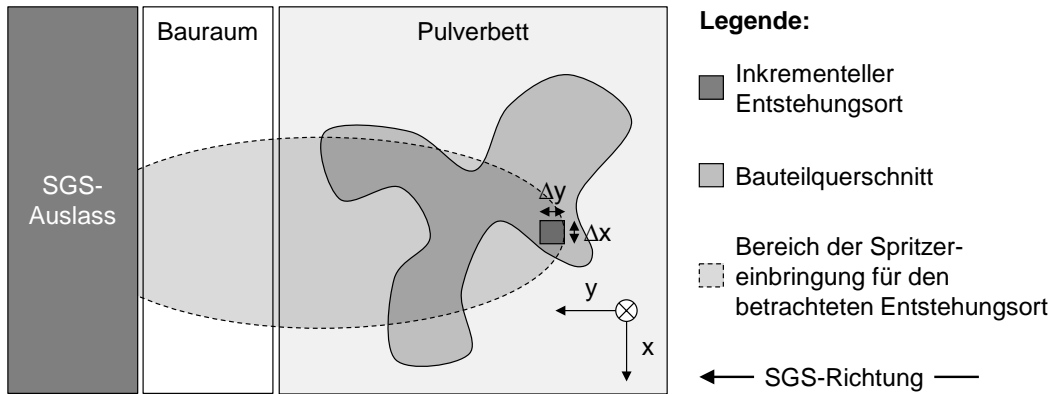


Abbildung 40: Schema der Spritzerentstehung und -einbringung in einer Schicht ausgehend von einem belichteten Bauteilinkrement

Da die experimentellen Eingangsgrößen nur als diskrete Werte ermittelt werden können, wird ein numerisches Modell genutzt. Die einzelnen Inkremente können als finite Elemente im Sinne der numerischen mathematischen Verfahren verstanden werden. Das Modell geht für die Berechnung von einem Spritzerentstehungsort (Berechnungsinkrement) aus, der sich über die Querschnittsfläche des Bauteils in der jeweiligen Schicht bewegt. Ausgehend von diesem Entstehungsort fliegen die Prozessspritzer in einem fixen räumlichen Verteilungsprofil durch die LBM-Anlage und setzen sich auf der Baupflache oder im angrenzenden Bauraum ab. Damit kann für jeden Entstehungsort berechnet werden, wo die dort erzeugten Spritzer landen. Spritzer, die in den SGS-Auslass fliegen, werden nicht beim Recycling berücksichtigt. Für die Modellierung werden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

### Spritzerentstehung:

- Es wird davon ausgegangen, dass die Masse der entstandenen Spritzer proportional zum verfestigten Bauteilvolumen ist.
- Es wird angenommen, dass sich die volumenspezifische Spritzerentstehung über die Bauhöhe konstant verhält (vgl. auch LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018A). Dies umfasst alle relevanten Charakteristika der Prozessspritzer (Masse, Partikelgrößenverteilung und Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente).

- Es wird weiterhin die Annahme getroffen, dass sich die Spritzerentstehung nicht durch die Alterung des Pulvers verändert.

### **Räumliches Verteilungsprofil der Spritzer:**

- Es wird von einem laminaren und einheitlichen Schutzgasstrom über die Baufläche ausgegangen. Unter dieser Voraussetzung ist das räumliche Einbringungsprofil der Spritzer über die Baufläche verschiebbar.
- Es wird angenommen, dass keine Spritzer gegen die SGS-Richtung fliegen.

**Bauflächengeometrie:** Aufgrund der Häufigkeit in der Praxis wird von einer rechteckigen Form der Baufläche ausgegangen. Zur Beschreibung eignet sich ein kartesisches Koordinatensystem. Die Modellierung kann für runde Bauflächen in ein zylindrisches Koordinatensystem transformiert werden.

**Siebung:** Es wird von einer idealen Trennung der Partikelgrößenverteilung bei der Maschenweite des Siebs ausgegangen. Dies betrifft die Verwendung der Summenkurve der Partikelgrößenverteilung zur Bestimmung des Unterkorn- und Überkornanteils.

Es wird ein numerisches und deterministisches Modell gewählt, um die betrachteten Effekte näherungsweise zu beschreiben. Es handelt sich weiterhin um ein formales und parametrisiertes Modell, für das im Rahmen der Kalibrierung im Einzelfall Eingangsgrößen experimentell zu bestimmen sind.

### **5.3.2 Mathematische Beschreibung**

Der dargelegte Aufbau des Modells kann mathematisch beschrieben werden. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile genauer erläutert und mit Gleichungen definiert.

#### **Berechnungssinkrement**

Das Berechnungssinkrement wird durch die Seitenlängen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  beschrieben. Es dehnt sich als rechteckige Fläche in die x- und y-Richtung des Koordinatensystems der Anlage aus. Das Berechnungssinkrement kann grundsätzlich frei gewählt werden. Durch die Wahl der Größe bestimmt sich der Diskretisierungsgrad des Modells. Bei der softwaretechnischen Umsetzung besteht allgemein ein Zielkonflikt zwischen Inkrementgröße und Rechenzeit.

## Räumliches Verteilungsprofil der Prozessspritzer

Das Profil der räumlichen Verteilung des Spritzerunterkorns ( $M_{SUK}$ ) kann gemäß Gleichung 5.1 als zweidimensionale Matrix der Einzelmassen ausgedrückt werden. Diese spannt sich im lokalen  $i$ - $j$ -Koordinatensystem auf, das sich zusammen mit dem Entstehungsort der Prozessspritzer durch das Maschinenkoordinatensystem ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) bewegt. Das Profil weist die Länge  $n$  und die Breite  $m$  auf. Der Entstehungsort der Prozessspritzer befindet sich an der Position ( $\lfloor n/2 \rfloor$ , 1), was der ersten Spalte in  $i$ -Richtung und der mittleren Zeile in  $j$ -Richtung entspricht (vgl. Abbildung 41). Die Gaußklammer wird dabei zum Abrunden des Wertes auf eine natürliche Zahl verwendet.

$$\mathbf{M}_{SUK} = [M_{ij}] = \begin{bmatrix} m_{SUK,11} & \cdots & m_{SUK,1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{SUK,m1} & \cdots & m_{SUK,mn} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

mit  $i \in \{1, \dots, n\}$  und  $j \in \{1, \dots, m\}$

Ein exemplarisches Massenprofil  $M_{SUK}$  für die Konfiguration  $m = n = 7$  wird schematisch in Abbildung 41 dargestellt. Der Entstehungsort befindet sich dabei auf der Position (3,1).

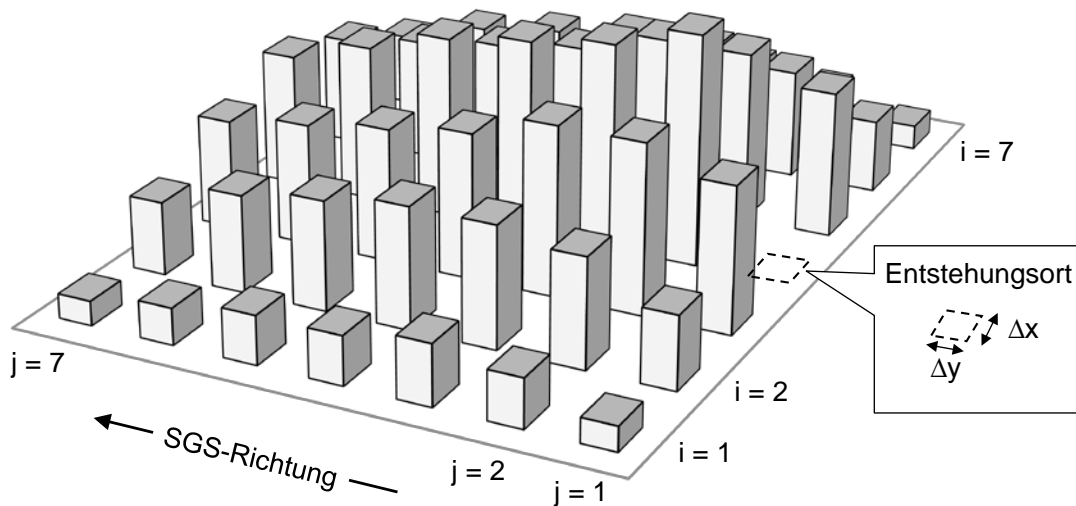


Abbildung 41: Illustration der räumlichen Verteilung von Prozessspritzern als Massenprofil im lokalen  $i$ - $j$ -Koordinatensystem

Die Werte des Profils sind spezifisch für die Kombination aus LBM-Anlage, verwendetem Werkstoff und den genutzten Prozessparametern (z. B. Schutzgasströmung). Die Länge und Breite der Matrix hängt von den Abmaßen der

betrachteten Anlage ab (vgl. Unterabschnitt 5.5.2). Im Hinblick auf die Kalibrierung des Modells kann das Spritzerunterkornprofil gemäß Gleichung 5.2 ausgedrückt werden aus dem Produkt der Gesamtspritzermasse pro Element ( $m_{ges,ij}$ ) und dem Unterkornanteil im jeweiligen Element ( $A_{UK,ij}$ ).

$$m_{SUK,ij} = A_{UK,ij} \cdot m_{ges,ij} \text{ mit } 0 \leq A_{UK} \leq 1 \quad (5.2)$$

Bei beiden Größen handelt es sich um zweidimensionale und ortsvariable Matrizen im lokalen  $i$ - $j$ -Koordinatensystem.

### Geometrie des Bauteilquerschnitts pro Schicht

Das räumliche Verteilungsprofil der Prozessspritzer bewegt sich während der Belichtung einer Schicht dynamisch über die Baufläche. Die Einbringung der Prozessspritzer in das Pulverbett in der betrachteten Schicht  $S$  wird durch die Bauteilgeometrie bestimmt. Der Bauteilquerschnitt gibt die zu belichtende Fläche und damit die Entstehungsorte der Spritzer vor. Die Geometrie des Querschnitts kann als zweidimensionale und binäre Matrix  $G_{BT,S}$  beschrieben werden. Sie befindet sich im Maschinenkoordinatensystem  $(x, y, z)$ . Den Elementen, deren Position auf der Querschnittsfläche des Bauteils liegt, wird der Wert 1 zugewiesen. Die restlichen Werte werden auf null gesetzt.

$$\mathbf{G}_{BT,S} = [G_{BT,S,xy}] = \begin{bmatrix} G_{BT,S,11} & \cdots & G_{BT,S,1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{BT,S,k1} & \cdots & G_{BT,S,kl} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

mit  $x \in \{1, \dots, k\}$  und  $y \in \{1, \dots, l\}$  und  $G_{BT,S,xy} \in \{0,1\}$

Die Werte der Matrix können bestimmt werden über der Bauteilgeometrie sowie die Positionierung und Orientierung des Bauteils im Bauraum.

### Geometrie von Pulverbett und Bauraum

Die Geometrie des Pulverbetts  $G_{PB}$  und des Bereichs des umgebenden Bauraums  $G_{BR}$ , werden als zweidimensionale und binäre Matrizen beschrieben. Die Indizes  $x$  und  $y$  geben dabei die Position der Elemente im Maschinenkoordinatensystem an.

$$\mathbf{G}_{PB} = [G_{PB,xy}] = \begin{bmatrix} G_{PB,11} & \cdots & G_{PB,1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{PB,k1} & \cdots & G_{PB,kl} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

mit  $x \in \{1, \dots, k\}$  und  $y \in \{1, \dots, l\}$  und  $G_{PB,xy} \in \{0,1\}$

$$\mathbf{G}_{BR} = [G_{BR,xy}] = \begin{bmatrix} G_{BR,11} & \cdots & G_{BR,1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{BR,k1} & \cdots & G_{BR,kl} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

mit  $x \in \{1, \dots, k\}$  und  $y \in \{1, \dots, l\}$  und  $G_{BR,xy} \in \{0,1\}$

Der jeweilige geometrische Bereich wird innerhalb der Matrix durch den Elementwert 1 hinterlegt. Die Werte ergeben sich aus den spezifischen Abmessungen der betrachteten LBM-Anlage und sind unabhängig vom Baujob.

### Berechnung der Spritzereinbringung in Pulverbett und Bauraum

Für die Ermittlung der Einbringung des entstehenden Spritzerunterkorns in die verschiedenen Bereiche (i. e. Pulverbett, umgebender Bauraum) wird das Verteilungsprofil elementweise über die Baufläche verschoben. Dieser Vorgang wird für jede Schicht  $S$  des Baujobs durchgeführt.

Die Berechnung wird in mehreren Schritten vorgenommen. Zuerst wird der Zusammenhang beschrieben, dass die maximale Spritzereinbringung pro Schicht für jedes  $x$ - $y$ -Element beschrieben werden kann durch das Aufsummieren aller eingebrachten Spritzer, die in der direkten Umgebung dieses Elements entstehen. Die Größe des Umgebungsbereichs ergibt sich dabei aus der Abmessung des Spritzerverteilungsprofils  $M_{SUK}$  mit Länge  $n$  und Breite  $m$  (vgl. Gleichung 5.1). Aufgrund der zentralen Position des Entstehungsortes innerhalb des Spritzerverteilungsprofils in  $j$ -Richtung wird in dieser Dimension zwischen den Werten  $-[n/2]$  und  $[n/2]$  aufsummiert.

$$m_{ESUK,S,xy} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=-[n/2]}^{[n/2]} m_{(x+i)(y+j)} \quad (5.6)$$

Dieser Schritt kann gedanklich als ein Verschieben des lokalen  $i$ - $j$ -Koordinatensystems durch das absolute  $x$ - $y$ -Koordinatensystem bzw. das Maschinenkoordinatensystem verstanden werden. Im zweiten Schritt wird die tatsächliche Spritzereinbringung mit drei geometrischen Bedingungen verknüpft:

1. Es entstehen nur dann Prozessspritzer, wenn der Entstehungsort  $(x+i, y+j)$  auf dem Bauteilquerschnitt in der jeweiligen Schicht ( $G_{BT,S}$ ) liegt.
2. Der Einbringungsort  $(x,y)$  muss im jeweiligen Interessenbereich (i. e. Pulverbett,  $G_{PB}$  oder umgebender Bauraum,  $G_{BR}$ ) liegen.

3. Prozessspritzer, die innerhalb der Baufläche und dort auf dem Bauteilquerschnitt ( $G_{BT,S}$ ) landen, werden nicht dem Pulverbett zugerechnet.

Basierend auf diesen Bedingungen können die eingebrachten Spritzerunterkornmassen pro Schicht für das Pulverbett ( $m_{ESUK,S,PB}$ ) und den umgebenden Bauraum ( $m_{ESUK,S,BR}$ ) gemäß der Gleichung 5.7 und 5.9 bestimmt werden. Dazu werden zur Beschreibung der geometrischen Bedingungen für die beiden Bereiche die Terme  $B_{PB}$  und  $B_{BR}$  eingeführt.

$$m_{ESUK,S,PB} = \sum_{x,y} B_{PB,xy} \quad (5.7)$$

mit

$$B_{PB,xy} = \begin{cases} m_{ESUK,S,xy} & G_{BT,S,(i+x)(j+y)} = 1 \wedge G_{PB,xy} = 1 \wedge G_{BT,S,xy} = 0 \\ 0 & \text{alle anderen Fälle} \end{cases} \quad (5.8)$$

$$m_{ESUK,S,BR} = \sum_{x,y} B_{BR,xy} \quad (5.9)$$

mit

$$B_{BR,xy} = \begin{cases} m_{ESUK,S,xy} & G_{BT,S,(i+x)(j+y)} = 1 \wedge G_{BR,xy} = 1 \\ 0 & \text{alle anderen Fälle} \end{cases} \quad (5.10)$$

Nur wenn die jeweiligen Bedingungen erfüllt sind, fließt die Masse des eingebrachten Spritzerunterkorns in dem jeweiligen Element in die Summe ein.

Im letzten Schritt können gemäß Gleichung 5.11 und 5.12 die eingebrachten Spritzerunterkornmassen pro Schicht über den gesamten Baujob bzw. alle Schichten aufsummiert werden. Damit ergeben sich die Gesamtmassen des eingebrachten Spritzerunterkorns pro Baujob in den beiden Bereichen ( $m_{ESUK,PB}$  und  $m_{ESUK,BR}$ ).

$$m_{ESUK,PB} = \sum_S m_{ESUK,S,PB} \quad (5.11)$$

$$m_{ESUK,BR} = \sum_S m_{ESUK,S,BR} \quad (5.12)$$

Insgesamt kann über die Verknüpfung des zweidimensionalen Spritzerprofils und der Geometrien von Bauteil, Pulverbett und Bauraum beschrieben werden, wo die



bei der Verfestigung des Bauteils entstehenden Prozessspritzer landen. Durch Aufsummieren kann die Masse des gesamten eingebrachten Spritzerunterkorns des Baujobs im Pulverbett und im Bauraum näherungsweise berechnet werden. Eine alternative Darstellung des Berechnungsansatzes, die sich direkter für eine softwarebasierte Umsetzung eignet, wird im Anhang anhand eines Flussdiagramms erläutert (vgl. Anhang A5).

## 5.4 Pulverchargen-Ebene

Der Zweck dieses Teils des Modells besteht darin, die beteiligten Pulvermengen und deren Mischverhältnisse über den Verlauf der Verarbeitung der Charge für einen gegebenen Anwendungsfall zu beschreiben. Den Betrachtungsgegenstand bildet eine Pulvermenge, die über mehrere Baujobs (bzw. Zyklen) verarbeitet wird. Diese Pulvercharge kann gleichzeitig als Systemgrenze verstanden werden, wobei gefertigte Bauteile und zu entsorgende Verluste Abflüsse aus dem System darstellen. Das Ergebnis auf dieser Ebene stellen die Massenverhältnisse der Pulverbestandteile nach dem Mischen dar. Die Mengenverhältnisse werden benötigt für die Bestimmung der Änderung des ESUK-Anteils und des Elementgehalts beim Mischen von zwei Pulvermengen.

### 5.4.1 Berechnungsansatz

Die für das Teilmodell relevanten Materialflüsse durch einen Baujob  $i$  und den nachfolgenden Mischvorgang gehen aus Abbildung 42 hervor. Zur Vereinfachung der Darstellung wird von einem Job pro Zyklus ausgegangen.

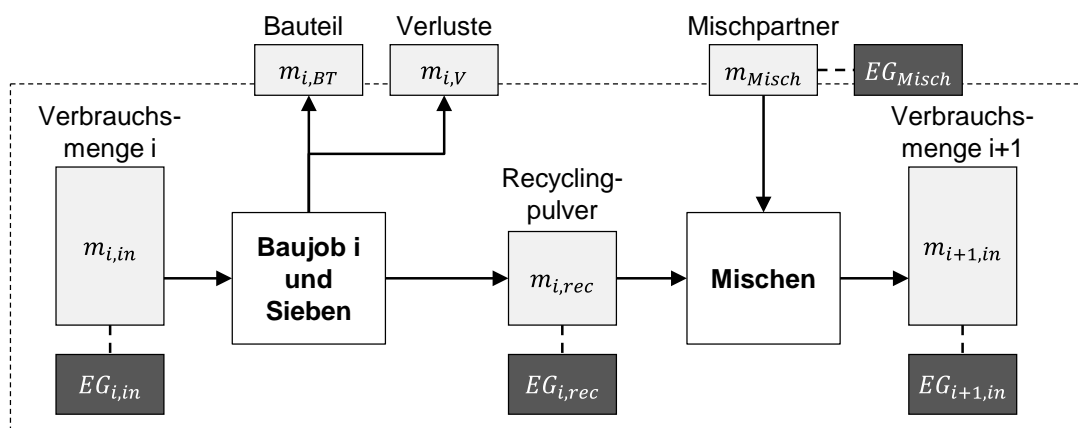


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Verarbeitung einer eingesetzten Pulvermenge für einen Baujob

Für den Baujob wird mit einer Verbrauchsmenge  $m_{i,in}$  gerechnet. Diese entspricht der für den gegebenen Baujob eingesetzten Pulvermenge, ohne dass dabei Reste im Pulvertank berücksichtigt werden. Beim Baujob und dem anschließenden Sieben verlässt Pulver als Bauteil  $m_{i,BT}$  und als Verluste  $m_{i,V}$  das System. Die Pulververlustmasse  $m_{i,V}$  schließt dabei sämtliche Verlustarten im Prozess ein, inklusive Verlusten im Filter, beim Sieben (i. e. Überkorn), in Stützstrukturen und bei der Reinigung. Nach dem Sieben bleibt eine Menge an Recyclingpulver  $m_{i,rec}$  übrig. Dieses kann wiederverwendet werden und ist gegebenenfalls noch mit einer anderen Teilpulvermenge  $m_{Misch}$  zu vereinen, um eine ausreichend große Pulvermenge für den nächsten Baujob zu erreichen. Das Vorgehen beim Mischen hängt von dem verwendeten Mischkonzept ab. Daher gilt es im Folgenden eine Fallunterscheidung zwischen den beiden in Unterabschnitt 2.2.3 beschriebenen Ansätzen zu treffen.

### 5.4.2 Mathematische Beschreibung

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den beteiligten Pulverteilmenen anhand von Massenbilanzen mathematisch beschrieben. Dabei wird zwischen Baujobs  $i$  und Zyklen  $n$  unterschieden.

#### 5.4.2.1 Massenbilanz beim Baujob und anschließenden Sieben

Die beteiligten Pulvermengen an einem Baujob können anhand einer Massenbilanz allgemein gemäß Abbildung 43 beschrieben werden. Dabei sind Teilmenen im Pulverbett  $m_{i,PB}$ , im restlichen Bauraum  $m_{i,BR}$  sowie im Überlaufbehälter  $m_{i,ÜL}$  beteiligt. Es wird eine Fallunterscheidung hinsichtlich des Recycling des Bauraumpulvers getroffen.

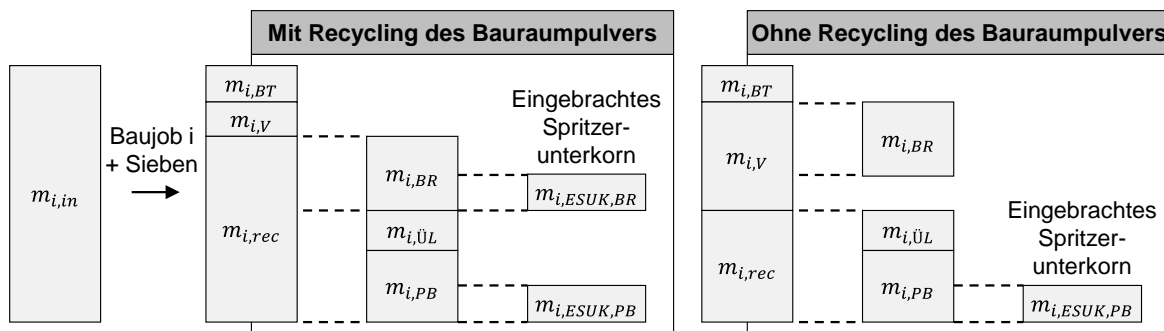


Abbildung 43: Massenbilanz beim Baujob und Sieben mit und ohne Recycling des Bauraumpulvers

Die Eingangsmasse des Pulvers bzw. die Verbrauchsmenge  $m_{i,in}$  wird durch den Baujob in mehrere Teilmengen zerlegt. Die Zusammensetzung des Recyclingpulvers  $m_{i,rec}$ , die sich je nach Umgang mit dem Bauraumpulver unterscheidet, kann gemäß Gleichung 5.13 berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 m_{i,rec} &= m_{i,in} - m_{i,V} - m_{i,BT} \\
 &= \begin{cases} m_{i,PB} + m_{i,ÜL} + m_{i,BR} & \text{mit Recycling Bauraumpulver} \\ m_{i,PB} + m_{i,ÜL} & \text{ohne Recycling Bauraumpulver} \end{cases} \quad (5.13)
 \end{aligned}$$

Das Recyclingpulver setzt sich dabei mindestens aus dem Pulverüberlauf  $m_{i,ÜL}$  sowie dem nicht verfestigten Pulver aus dem Pulverbett  $m_{i,PB}$  zusammen. Bei dem Bauraumpulver  $m_{i,BR}$  kann im Einzelfall entschieden werden, ob das Pulver wiederverwendet werden soll. Je nach Umgang (Entsorgung oder Recycling) ist dieses ein Teil der Verlustpulvermasse oder der Recyclingpulvermasse. Die Entscheidung über den Umgang mit dem Bauraumpulver ist Teil der Pulverrecyclingstrategie. Im Hinblick auf das ESUK kann analog folgende Gleichung abgeleitet werden.

$$m_{i,ESUK} = \begin{cases} m_{i,EUSK,PB} + m_{i,EUSK,BR} & \text{mit Recycling des Bauraumpulvers} \\ m_{i,EUSK,PB} & \text{ohne Recycling des Bauraumpulvers} \end{cases} \quad (5.14)$$

Die Größen  $m_{i,EUSK,BR}$  und  $m_{i,EUSK,PB}$  beschreiben die absoluten Massen des ESUK im Bauraum und Pulverbett und können auf Baujob-Ebene gemäß Gleichungen 5.11 und 5.12 bestimmt werden. Die beiden Modellebenen sind über diese beiden Größen miteinander verbunden.

#### 5.4.2.2 Massenbilanzen beim Mischen

Beim Mischen gilt es zwischen den in Unterabschnitt 2.2.3 beschriebenen Mischkonzepten kollektive Alterung und kontinuierliches Auffrischen zu unterscheiden. Die Massenbilanzen für die beiden Varianten sind in Abbildung 44 veranschaulicht. Im Hinblick auf die Begrifflichkeit ist zu beachten, dass beim kontinuierlichen Auffrischen typischerweise ein Job pro Zyklus vorgesehen ist, während bei der kollektiven Alterung mehrere Jobs pro Zyklus vorkommen können.

Beim Auffrischen wird das Recyclingpulver mit einem Auffrischpulver  $m_{i,AF}$  vermischt. Als Pulver für das Auffrischen werden Zustände mit geringerem Zyklusalter (z. B. Neupulver) verwendet.

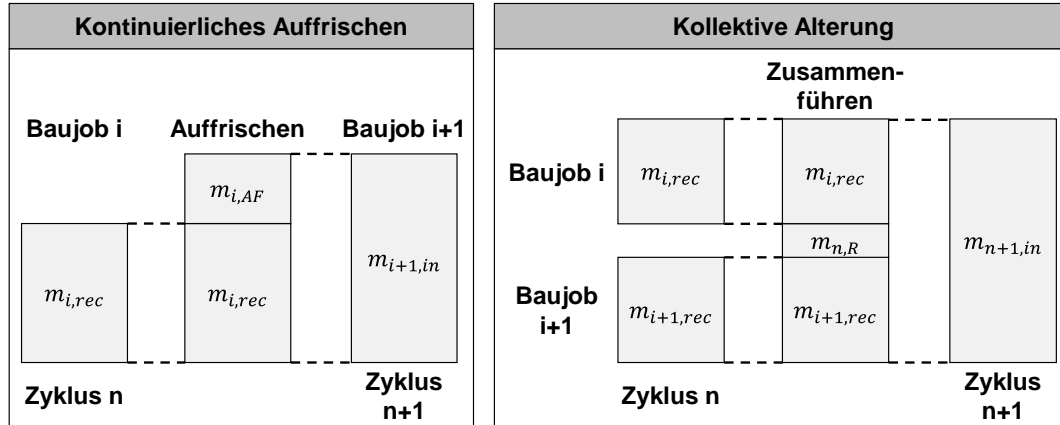


Abbildung 44: Schematische Beschreibung der Mischkonzepte, ausgehend vom Recyclingpulver des Baujob i im Zyklus n

Bei der kollektiven Alterung werden Recyclingpulver aus dem gleichen Zyklus vereinigt. Dabei wird die Restpulvermenge aus dem n-ten Zyklus  $m_{n,R}$  zugemischt, die bei der Aufteilung der Pulvermenge auf die einzelnen Baujobs im vorherigen Zyklus übrig geblieben ist.

### Elementgehalte beim kontinuierlichen Auffrischen

Auch für die Berechnung der Elementgehalte der Pulver im Folgezyklus ist eine Fallunterscheidung zwischen den Mischkonzepten zu treffen. Beim kontinuierlichen Auffrischen gelten die folgenden Gleichungen. Damit kann der Elementgehalt der Pulvermenge für den Folgebaujob  $EG_{i+1,in}$  bestimmt werden.

$$m_{i+1,in} = m_{i,rec} + m_{i,AF} \quad (5.15)$$

$$EG_{i+1,in} = \frac{m_{i,AF}}{m_{i+1,in}} \cdot EG_{i,AF} + \frac{m_{i,rec}}{m_{i+1,in}} \cdot EG_{i,rec} \quad (5.16)$$

$$EG_{i,rec} = \frac{m_{i,rec} - m_{i,ESUK}}{m_{i,rec}} \cdot EG_{i,in} + \frac{m_{i,ESUK}}{m_{i,rec}} \cdot EG_{i,ESUK} \quad (5.17)$$

Der Elementgehalt des Recyclingpulvers ergibt sich dabei aus dem Massenanteil des Spritzerunterkorn im Recyclingpulver.

### Elementgehalte bei der kollektiven Alterung

Bei der kollektiven Alterung ändert sich der Elementgehalt von Zyklus zu Zyklus. Der Elementgehalt des Pulvers in Zyklus n+1 ( $EG_{n+1,in}$ ) kann wie folgt über die Mischverhältnisse berechnet werden.

$$EG_{n+1,in} = \frac{m_{n,R}}{m_{n+1,in}} \cdot EG_{n,R} + \frac{m_{n,rec}}{m_{n+1,in}} \cdot EG_{n,rec} \quad (5.18)$$

$$EG_{n,R} = EG_{n,in} \quad (5.19)$$

$$m_{n+1,in} = m_{n,rec} + m_{n,R} \quad (5.20)$$

$$m_{n,rec} = \sum_i m_{i,rec} \quad (5.21)$$

$$EG_{n,rec} = \sum_i \frac{m_{i,rec} - m_{i,ESUK}}{m_{i,rec}} \cdot EG_{i,in} + \frac{m_{i,ESUK}}{m_{i,rec}} \cdot EG_{i,ESUK} \quad (5.22)$$

Die Recyclingpulvermenge pro Zyklus  $m_{n,rec}$  kann über die Jobs im Zyklus  $n$  aufsummiert werden (Gleichung 5.21). Der Elementgehalt des Recyclingpulvers ergibt sich aus dem Massenanteil des Spritzerunterkorns in den Recyclingpulvern der einzelnen Baujobs. Es ist davon auszugehen, dass der Elementgehalt im Recyclingpulver immer höher liegt als der in der Verbrauchsmenge.

Insgesamt kann durch diese Gleichungen der Elementgehalt nach beliebigen Baujobs bestimmt werden. Für weiterführende Details zur Berechnung der Verbrauchsmenge  $m_{n,in}$  und dem Verlauf der verfügbaren Restmenge einer Pulvercharge über die Verarbeitung mittels LBM sei auf LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018B) verwiesen.

## 5.5 Kalibrierung des Modells

Da die Spritzerbildung von Anlage, Werkstoff und den Prozessparametern abhängt, variiert diese zwischen Anwendungsfällen. Mit der Kalibrierung wird das Modell auf den spezifischen Einzelfall angepasst. Die für die Modellierung benötigten Werte umfassen das räumliche Verteilungsprofil des Spritzerunterkorns ( $M_{SUK}$ ) sowie die Elementgehalte des Spritzerunterkorns und des Ausgangszustands ( $EG_{ESUK}$  und  $EG_0$ ). Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Werte im Anwendungsfall, je nach Material, Anlage und Prozessparametern unterscheiden.

### 5.5.1 Konzept

Das Konzept der experimentellen Kalibrierung beruht darauf, dass reine Prozessspritzer neben der Baufläche gesammelt werden können. In Abbildung 45 ist zu erkennen, dass die entstandenen Spritzer durch den Schutzgasstrom neben die Baufläche getragen wurden. Diese können dort mit geringem Aufwand gesammelt werden.

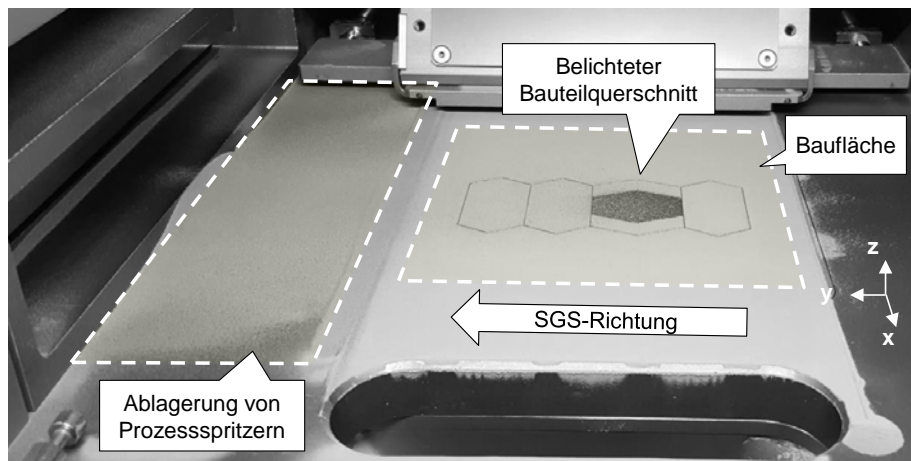


Abbildung 45: Ablagerung von Prozessspritzern im Bauraum am Beispiel der LBM-Anlage SLM125HL

Um ein räumlich aufgelöstes Spritzerprofil zu erlangen, werden die Spritzer nicht als Ganzes gesammelt, sondern im Auffangbereich mithilfe eines Rasters von Auffangbehältern isoliert. Es ist dafür ein Kalibrierungssinkrement  $a$  zu wählen, das als Elementarzelle für das Kalibrierungsprofil dient. Es bestimmt die räumliche Auflösung und den Diskretisierungsgrad des Spritzerprofils. Im Folgenden wird von einer quadratischen Form mit gleichen Seitenlängen ausgegangen, wenngleich auch andere Geometrien genutzt werden können. Die Anordnung der Vorrichtung und der für die Kalibrierung genutzte Baujob sind schematisch in Abbildung 46 dargestellt.

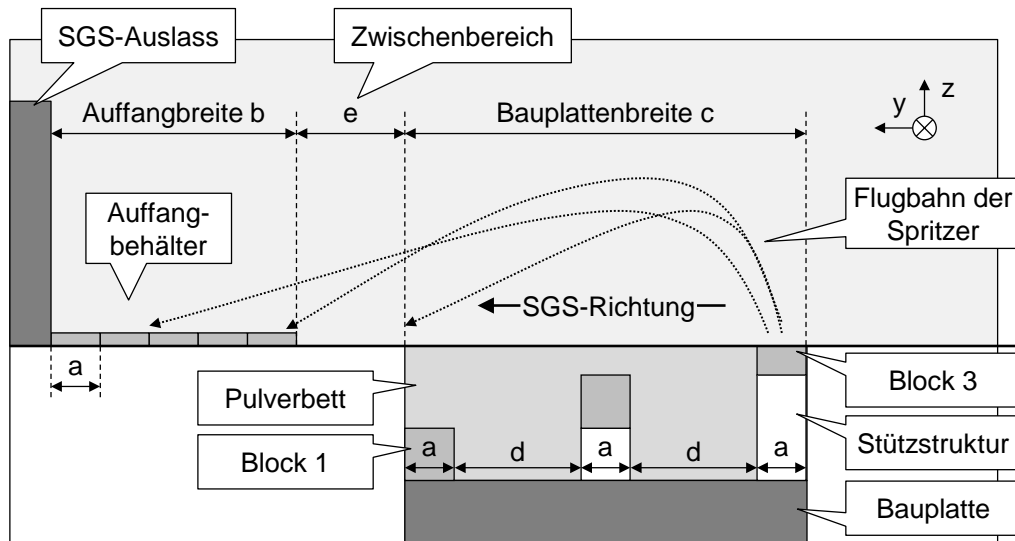


Abbildung 46: Schematischer Aufbau des Kalibrierungsversuchs in der LBM-Anlage mit drei Spritzerblöcken und Auffangbehältern vor dem SGS-Auslass

Da die Breite des Auffangbereichs das geforderte Spritzerprofil in der Regel nicht vollständig abdeckt, ist die Kalibrierung in mehreren Phasen durchzuführen. Im Kalibrierungsbaujob werden daher mehrere Blöcke vorgesehen (mindestens zwei), die gezielt in ihrem Abstand zum Auffangbereich variieren. Damit werden je nach Block sowohl kurz- als auch weitfliegende Spritzer gesammelt. Somit kann die ganze Breite des zu bestimmenden Spritzerprofils  $M_{SUK}$  abgedeckt werden. Der Zusammenhang wird in Abbildung 47 schematisch verdeutlicht.

Das ESUK-Profil deckt die gesamte Fläche in der Anlage ab, auf der Spritzer landen können. Bei der Verwendung mehrerer Blöcke wird das Kalibrierinkrement relativ zum Auffangbereich verschoben, so dass das Profil ganz abgedeckt wird. Die Schalen im Auffangbereich sind nach jedem Block zu wiegen und zu leeren, damit die Proben nicht mit Prozessspritzern des nachfolgenden Blocks vermengt werden. Sollte es zu Überlappbereichen kommen, so können diese über Mittelwerte aus den Werten der Behälter in den betroffenen Spalten berücksichtigt werden.

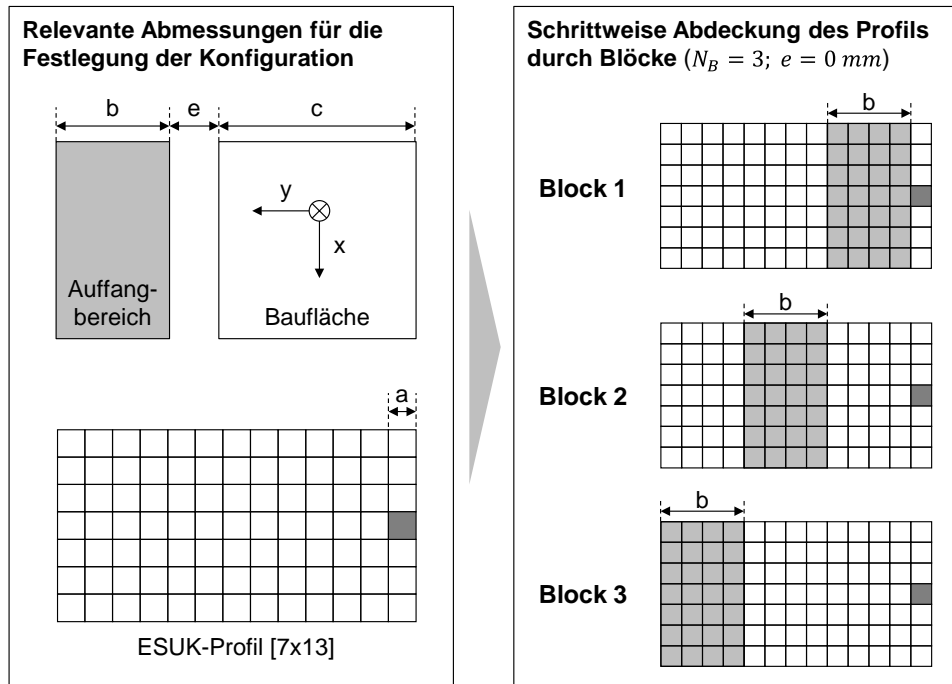


Abbildung 47: Ableitung der Profildimension aus den Abmessungen des LBM-Anlage und Zuordnung der Proben aus drei Blöcken zu den Zellen des ESUK-Profiles

### 5.5.2 Konfiguration von Kalibrierjob und Auffangbehältern

Als Konfiguration wird die Wahl der in Abbildung 46 beschriebenen Parameter verstanden. Ausschlaggebend für die Wahl der Konfiguration sind die Abmessungen innerhalb der LBM-Anlage. Die Anzahl der Blöcke kann durch die Gleichung 5.23 berechnet werden. Es wird dabei abgerundet auf die ganzzahlige Anzahl der Blöcke  $N_B$ .

$$\frac{b + c + e}{b} \approx N_B \text{ mit } N_B \in \mathbb{N} > 2 \quad (5.23)$$

Bei der Konfiguration spielt die Größe des Kalibrierinkrements  $a$  eine zentrale Rolle. Bei der Wahl besteht ein Zielkonflikt hinsichtlich Aufwand und Genauigkeit. Wird das Kalibrierinkrement zu klein gewählt, entsteht eine hohe Probenanzahl und der Aufwand zur Messung sowie die Wahrscheinlichkeit von unzureichenden Probenmengen für die geplanten Eigenschaftsmessungen steigen. Bei einem zu großen Wert weist das abgeleitete Profil eine geringe räumliche Auflösung und damit eine unzureichende Genauigkeit auf. Für die Wahl dieses Parameters wird im Einzelfall ein heuristisches Vorgehen vorgesehen, das durch die im Folgenden beschriebenen mathematischen Randbedingungen unterstützt wird. In der Regel existiert dabei mehr als eine mathematische Lösung.



$$\frac{c}{a} > 3 \quad (5.24)$$

$$\frac{b}{a} = N_S \text{ mit } N_S \in \mathbb{N} \quad (5.25)$$

$$\frac{d}{a} \approx N_d \text{ mit } N_d \in \mathbb{N} \quad (5.26)$$

$$c = N_B \cdot a + (N_B - 1) \cdot d \quad (5.27)$$

Aus 5.25 und 5.27 folgt

$$a < d = \frac{c - N_B \cdot a}{N_B - 1} = \frac{c - N_B \cdot b}{(N_B - 1) N_S} \quad (5.28)$$

Die Breite der Bauplatte sollten mindestens 3 Inkrementbreiten betragen. Dies bestimmt die räumliche Auflösung der Spritzerverteilung im Pulverbett. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Breite des Auffangbereichs  $b$  ein ganzzahliges Vielfaches des Inkrements  $a$  sein sollte, um den Bereich möglichst gut auszunutzen. Die Inkrementbreite  $a$  sollte idealerweise ein ganzzahliges Vielfaches der Zwischenraumbreite  $d$  zwischen den Blöcken sein. Damit können die Teilprofile, die jeweils relativ zu der Position der Blöcke entstehen, ideal zusammengesetzt werden.

Die Bauhöhe der Behälter sollte möglichst gering gehalten werden. Es sollte aber gewährleistet sein, dass die minimal benötigte Probenmenge in den Behälter passt. Aufgrund der Positionierung der Blöcke im Bauraum werden Stützstrukturen benötigt, deren Verfestigung im Prozess geringe Spritzermengen erzeugt. Es wird davon ausgegangen, dass die Spritzerentstehung dabei zu vernachlässigen ist. Grundsätzlich kann auch ein Korrekturfaktor ermittelt werden, wenn das Vorgehen nur mit Stützstrukturen und ohne die eigentlichen Blöcke durchgeführt wird.

### 5.5.3 Vorgehen bei der Kalibrierung

Der Ablauf zur Kalibrierung des Modells im Einzelfall wird in Abbildung 48 zusammengefasst. Optionale Schritte sind mit gestrichelten Linien umrahmt.

Als Ausgangspunkt werden im konkreten Anwendungsfall die relevanten Abmessungen im Bauraum bestimmt (vgl. Abbildung 47). Anschließend werden darauf basierend die Größe des Kalibrierungsinkrements und die restliche Konfiguration festgelegt. Für die Wahl der Minimalstützstruktur kann je nach

Wissenstand des Anwenders ein Vorversuch notwendig sein. Anschließend können das CAD-Modell und darauf basierend die Baujobdatei erstellt werden.

Im Rahmen der Durchführung sind die Vorrichtungen zum Auffangen der Spritzerpartikel (Behälter und Rahmen) herzustellen. Hierzu bieten sich beispielsweise additive Fertigungsverfahren auf Basis von Photopolymeren an (z. B. Stereolithographie). Dieser Schritt kann grundsätzlich direkt nach Festlegung der Inkrementgröße gestartet werden.

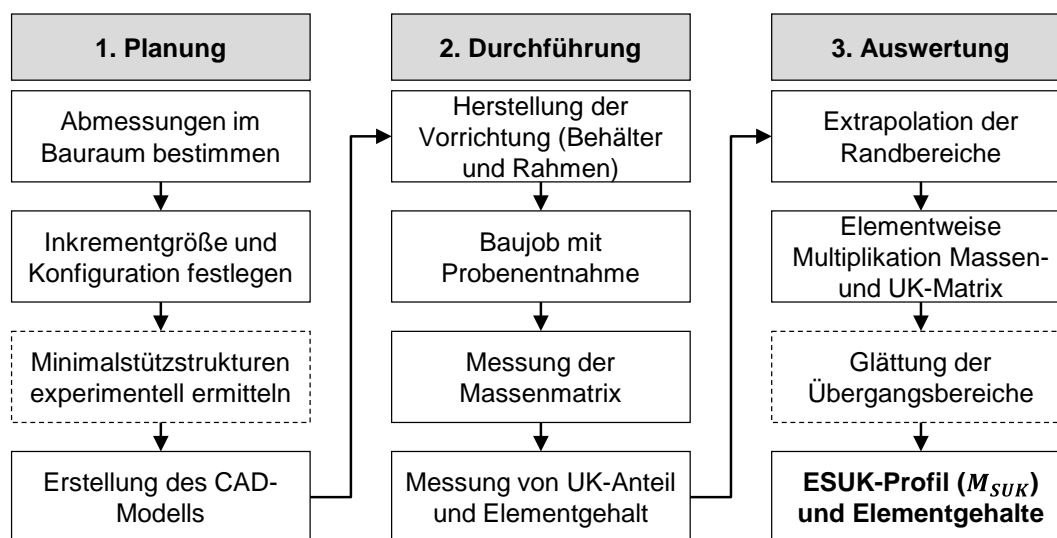


Abbildung 48: Vorgehen zur experimentellen Kalibrierung des ESUK-Profiles und der Elementgehalte

Anschließend kann der Kalibrierungsbaujob durchgeführt werden, wobei in Unterbrechungen des Bauvorgangs nach jedem Block die Proben entnommen werden. Dabei ist die Masse der einzelnen Behälter direkt zu messen. Nach dem Job werden die gesammelten Pulverproben und eine Probe des Ausgangszustands bezüglich Partikelgrößenverteilung und Elementgehalt des Unterkornanteils analysiert.

Bei der Auswertung gilt es zu berücksichtigen, dass an manchen Stellen des ESUK-Profiles mit der gegebenen Methode keine Werte direkt bestimmt werden können. Dies gilt beispielsweise für die Spalte, in der das Belichtungsinkrement liegt. Je nach Breite des Zwischenraums kann der betroffene Bereich größer ausfallen. Diese Randbereiche gilt es daher unter Verwendung der gemessenen Werte sinnvoll zu extrapolieren. Dafür wird erst der Zwischenraum der Massenmatrix basierend auf den beiden benachbarten Werten in y-Richtung linear extrapoliert. Mögliche

---

negative Werte werden auf 0 aufgerundet. Für den Unterkornanteil wird analog dazu vorgegangen. Die ESUK-Matrix kann danach über die elementweise Multiplikation der Werte in den Matrizen bestimmt werden. Falls Überlappbereiche bestehen, werden diese durch Mittelwerte geglättet. Bei der Durchführung des Kalibrierjobs können außerdem Verbrauchskennwerte zur Verwendung auf Pulverchargen-Ebene erfasst werden (z. B. Verluste, Pulververbrauch).

## **5.6 Validierung des Modells**

In diesem Abschnitt wird das Modell hinsichtlich Validität überprüft. Es wird eingangs die Plausibilität der Ergebnisse der Kalibrierung analysiert, die einen kritischen Schritt im Rahmen der Modellierung darstellt. Zweitens wird die Reproduzierbarkeit des experimentellen Vorgehens bei der Kalibrierung untersucht. Abschließend wird anhand eines Extremfalls die Genauigkeit der Prognose durch den Abgleich mit der experimentellen Realität überprüft. Es wird die Referenzanwendung genutzt, die bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde.

### **5.6.1 Plausibilität der Kalibrierung**

In diesem Unterabschnitt wird überprüft, ob das entwickelte Vorgehen zur Kalibrierung plausible Ergebnisse liefert. Hierfür wird das in Unterabschnitt 5.5.3 erläuterte Vorgehen zur Kalibrierung für die Referenzanwendung durchlaufen. Es werden die Phasen der Planung, Durchführung und Auswertung unterschieden. Für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieses Unterabschnitts werden Daten aus HUSZAR 2018 verwendet.

#### **Planung**

Die relevanten Abmessungen in der Referenzanwendung (LBM-Anlage SLM125HL) und die Bestimmung der Parameter  $N_B$  und  $a$  anhand der mathematischen Randbedingungen sind in Abbildung 49 zusammengestellt. Es ergibt sich eine Konfiguration mit drei Blöcken und einer Inkrementgröße von 16 mm. Im Auffangbereich werden vier Spalten vorgesehen. Es bestehen zwei Überschneidungsbereiche in den Spalten 4 und 7.

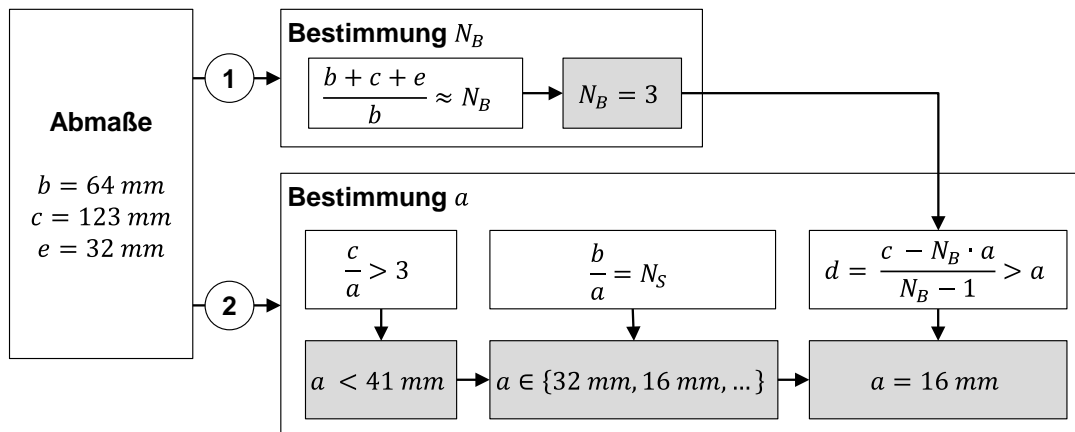


Abbildung 49: Berechnungsschema für die Anzahl der Blöcke und das Kalibrierungssinkrement sowie Lösung für die betrachtete Referenzanwendung

### Durchführung

Der Kalibrierungsbaujob ist in Abbildung 50 (a, b) dargestellt. Die minimal herstellbaren Stützstrukturen für die gewählte Inkrementgröße wurden in einem Vorversuch bestimmt.

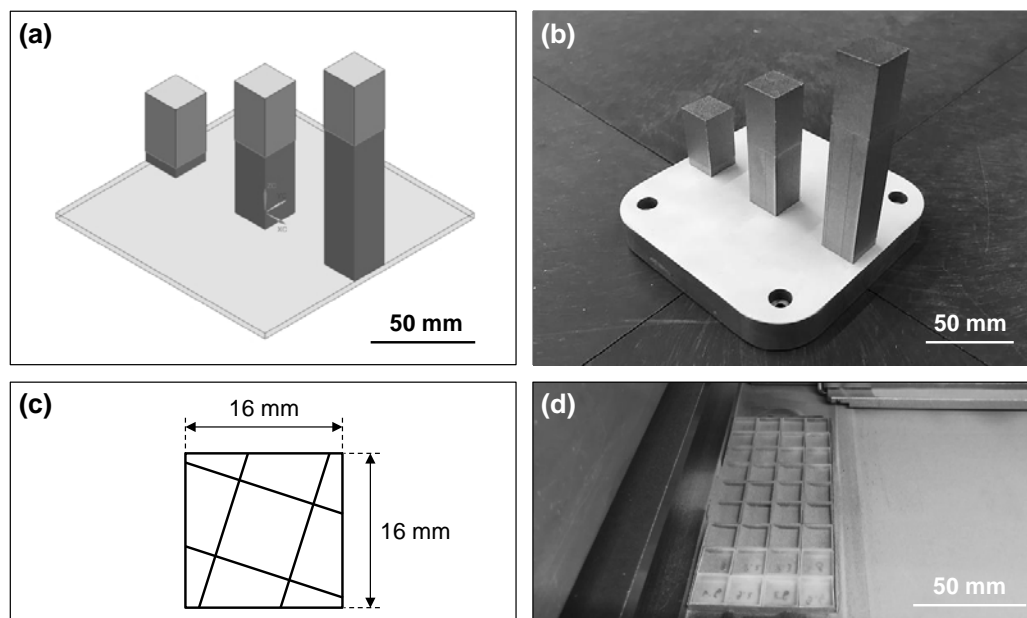
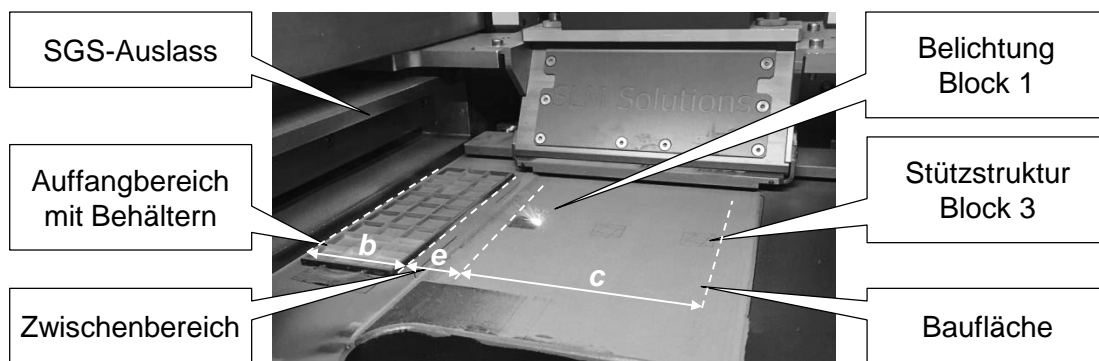


Abbildung 50: (a) Kalibrierungsbaujob mit drei Blöcken und Stützstrukturen als Baujobdatei; (b) Kalibrierungsbaujobs als gefertigtes Bauteil; (c) Detailansicht der Stützstrukturen im Schnitt; (d) Vorrichtung zur Probennahme (Auffangbehälter und Rahmen)

In diesem Fall entspricht deren Querschnitt 16 % der Querschnittsfläche des Blocks. In der Abbildung wird außerdem die Vorrichtung zur Probenentnahme gezeigt. Sie besteht aus den einzelnen Behältern, die mittels Stereolithographie hergestellt wurden.

Ein Rahmen dient als Aufnahme, in welche die Behälter einfach und in definierter Lage eingesetzt werden können. Der Rahmen ist in Relation zu der Lage der Blöcke ausgerichtet. Abbildung 51 zeigt die Fertigung des Kalibrierungsbaujobs.



*Abbildung 51: Belichtung des ersten Blocks im Rahmen des Kalibrierungsjobs für die Referenzanwendung und Auffangen der Spritzer in Vorrichtung*

Bei der Entnahme der Behälter werden deren Massen bestimmt. Für den Werkstoff AlSi10Mg wird Sauerstoff als kritisches nichtmetallisches Oberflächenelement ausgewählt. Die Pulverproben werden anschließend hinsichtlich Partikelgrößenverteilung und Sauerstoffgehalt des Unterkorns analysiert.

### **Auswertung**

Im Rahmen der Auswertung werden die Werte für Masse und Unterkornanteil im Zwischenbereich durch lineare Extrapolation in y-Richtung ergänzt. Die Überlappbereiche im Profil werden durch Mittelwerte geglättet. Die Ergebnisse der Kalibrierung werden im Folgenden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Plausibilität diskutiert.

#### **5.6.1.1 Massenverteilung**

Die durch die Kalibrierung ermittelte Massenverteilung geht aus Abbildung 52 hervor. Diese gibt die gemessene Massenzunahme in den jeweiligen Behältern des Profils wieder, die sich über die Bauhöhe von 30 mm ergeben hat.

Es zeigt sich eine Verteilung, die ihr Maximum in einer Entfernung von ca. 64 mm in y-Richtung zum Entstehungsort aufweist. Weiterhin sinken die Werte an den Rändern auf nahezu null ab. Bezogen auf das Entstehungsvolumen liegen die Spritzermassen in Reihe 1 im Mittel bei  $0,9 \text{ mg/cm}^3$  und Reihe 9 analog bei  $1,6 \text{ mg/cm}^3$ . Im Vergleich zu dem entsprechenden Wert für das gesamte Profil von  $875 \text{ mg/cm}^3$  fallen diese sehr gering aus. Der Großteil der Spritzer (90,1 %) fliegen maximal zwei Reihen bzw. 48 mm in x-Richtung zur Seite. Das Profil ist nicht symmetrisch bezüglich der mittleren Reihe 5, sondern der Massenschwerpunkt liegt in der Reihe 6. Das lässt Rückschlüsse auf die Schutzgasströmung in der Anlage zu.

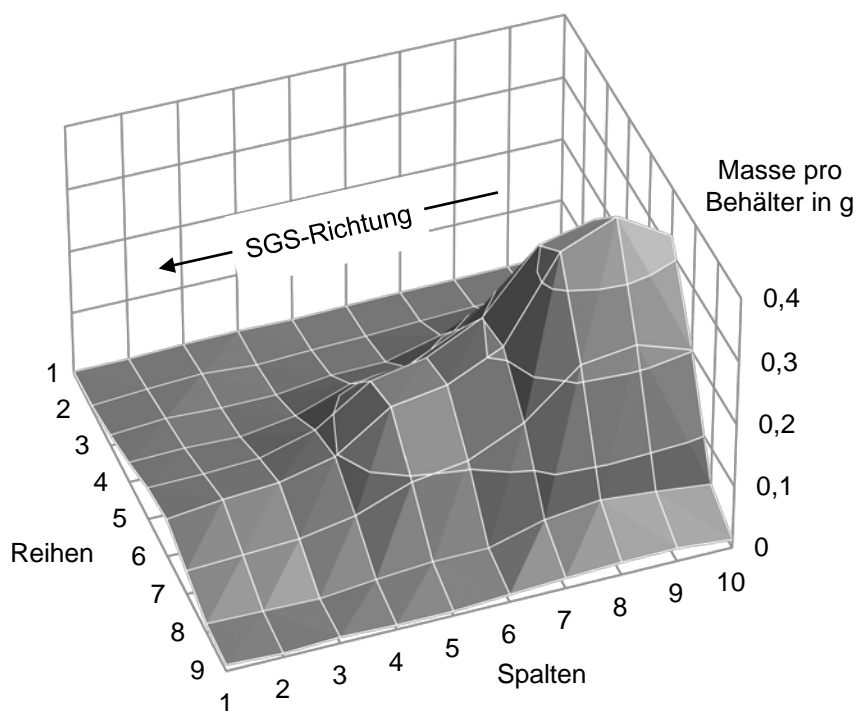


Abbildung 52: Massenverteilung der Prozessspritzer als linear interpoliertes Profil, Überlappbereiche durch Mittelwerte geglättet (Spalten 4 und 7)

Hieraus folgt, dass die Teilprofile aus den drei Blöcken gut zusammenpassen, was für ein gleichmäßiges laminares Strömungsfeld innerhalb des Bauraums spricht. Dieses strömt allerdings nicht parallel zur y-Achse, sondern leicht um die z-Achse gedreht. Die Form der Massenverteilung ist konsistent mit Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und Technik, im Besonderen der Arbeit von ANWAR & PHAM (2018). Dabei wird die räumliche Verteilung der Spritzerinbringung mit Bildaufnahmen analysiert. Der Verlauf in Abbildung 52 weist sein Maximum im Gegensatz zu der Ergebnissen aus ANWAR & PHAM (2018) nicht direkt am Entstehungsort auf, sondern ca. 64 mm in y-Richtung versetzt. Dies kann damit

erklärt werden, dass unterschiedliche Geometrien für die Untersuchungen verwendet werden. Der Entstehungsbereich bei ANWAR & PHAM streckt sich in y-Richtung über 80 mm aus, was fünf Spalten des Profils bei der gezeigten Kalibrierung entspricht.

### 5.6.1.2 Verteilung des Unterkornanteils

Der Unterkornanteil gibt an, welcher Volumen- bzw. Massenanteil des Pulvers unter dem Grenzdurchmesser liegt. Dieser entspricht der Maschenweite des verwendeten Siebs (75  $\mu\text{m}$ ). Zur Bestimmung wurden die Proben mit ausreichender Menge für die Messung der Partikelgrößenverteilung verwendet. Anschließend werden die Ergebnisse spaltenweise gemittelt, um allen Zellen des Profils Werte zuweisen zu können. Die resultierenden Unterkornanteile der Spalten (y-Richtung) für den Grenzwert von 75  $\mu\text{m}$  sind in Abbildung 53 aufgetragen.

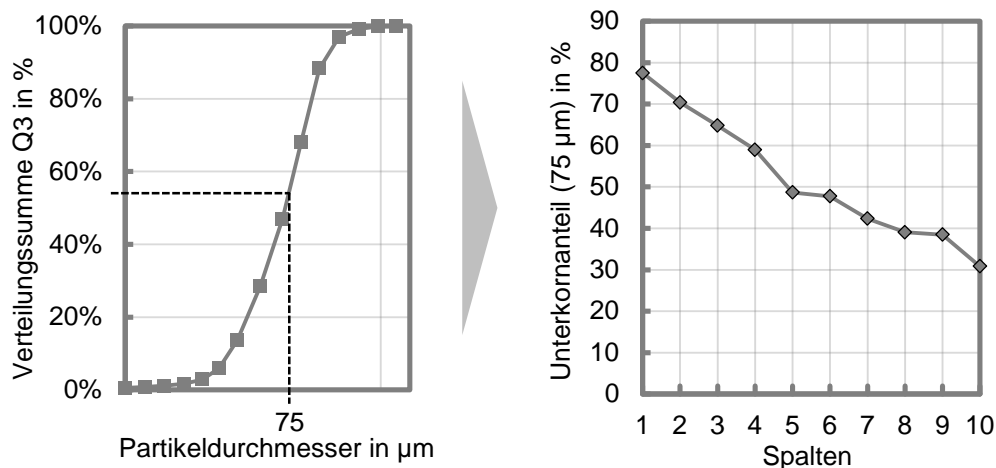


Abbildung 53: Schematische Grenzwertbestimmung in der kumulierten Partikelgrößenverteilung und Unterkornanteil (für 75  $\mu\text{m}$ ) der Prozessspritzer aus dem Kalibrierungsversuch

Es zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme des Unterkornanteils mit steigender Nähe zum Entstehungsort. Der Verlauf ist annähernd linear und bewegt sich zwischen 77,5 % und 30,8 %. Es liegen in der direkten Umgebung des Entstehungsortes deutlich mehr grobe Partikel vor als in weiterer Entfernung.

Dieser Gradient kann durch zwei Erklärungsansätze begründet werden. Erstens werden die feinen Partikel in der vorherrschenden Strömung weiter mitgetragen als die großen Partikel, bei denen die Gravitation stärker wirkt. Zweitens kann der

Gradient auch mit groben Agglomeratspritzern begründet werden, die vor allem in der Nähe des Entstehungsortes vorliegen. Diese bilden sich durch das Auftreffen noch flüssiger Spritzer auf andere Partikel. Bei der Kollision der Schmelze mit den herumliegenden Partikeln formen sich große Zusammenschlüsse aus mehreren Partikeln (vgl. LUTTER-GÜNTHER ET AL. (2018A), vgl. *Spatter Type 3*). Da diese jedoch überwiegend einen Durchmesser von mehr als 75  $\mu\text{m}$  aufweisen, kann der erste Erklärungsansatz als plausibler gesehen werden.

### 5.6.1.3 Verteilung des Elementgehalts

Die Ergebnisse für den Sauerstoffgehalt, der in dieser Anwendung als der relevante Elementgehalt ausgewählt wurde, sind in Abbildung 54 aufgetragen. Für die Messungen werden die Proben des ESUK-Profiles spaltenweise vereint. Weiterhin werden die Pulverproben vor der Messung gesiebt, um das Spritzerüberkorn zu entfernen.

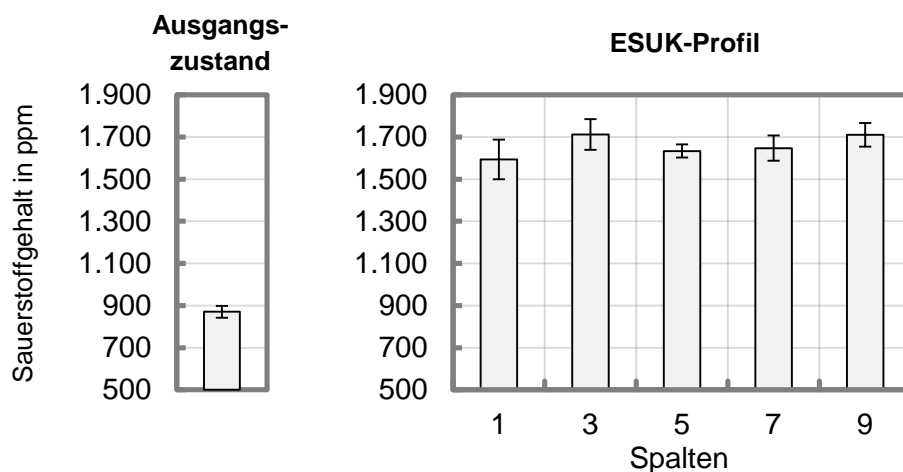


Abbildung 54: Sauerstoffgehalt des Ausgangszustands und des Spritzerunterkorns aus dem ESUK-Profil, gemessen mittels Heißgasextraktion; Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messungen ( $n = 5$ )

Es zeigt sich, dass sich die Werte im Bereich zwischen  $1.593 \pm 94$  ppm und  $1.711 \pm 73$  ppm bewegen. Auch wenn ein leichter Trend hin zu einem höheren Sauerstoffgehalt in der Nähe des Entstehungsortes zu erkennen ist, liegen die Werte angesichts der Varianz in der Messung auf gleichem Niveau. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich der Sauerstoffgehalt nur unwesentlich innerhalb des Spritzerprofils ändert. Im Vergleich zum Ausgangszustand ( $870 \pm 28$  ppm) fallen



die Sauerstoffwerte ungefähr doppelt so hoch aus. Der Anstieg des Sauerstoffs in diesem Fall stimmt mit den bisherigen Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und Technik überein (SIMONELLI ET AL. 2015).

Insgesamt zeigt sich, dass durch die Kalibrierung ein Verteilungsprofil des Spritzerunterkorns ermittelt werden kann, das einen plausiblen Verlauf aufweist (ANWAR & PHAM 2018). Die Ergebnisse verhalten sich konsistent zum Stand der Forschung und Technik (SIMONELLI ET AL. 2015) und bestätigen die für die Modellierung getroffenen Annahmen sowie das Vorgehen zur Kalibrierung.

### 5.6.2 Reproduzierbarkeit der Kalibrierung

Eine Voraussetzung für die Validität des Vorgehens bei der Kalibrierung ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Um diese zu bewerten, wurde der Kalibrierungsbaujob wiederholt durchgeführt. Die Massenprofile sind in Abbildung 55 zur besseren Vergleichbarkeit anhand der Verläufe der Mittelwerte der Reihen und Spalten zusammengefasst.

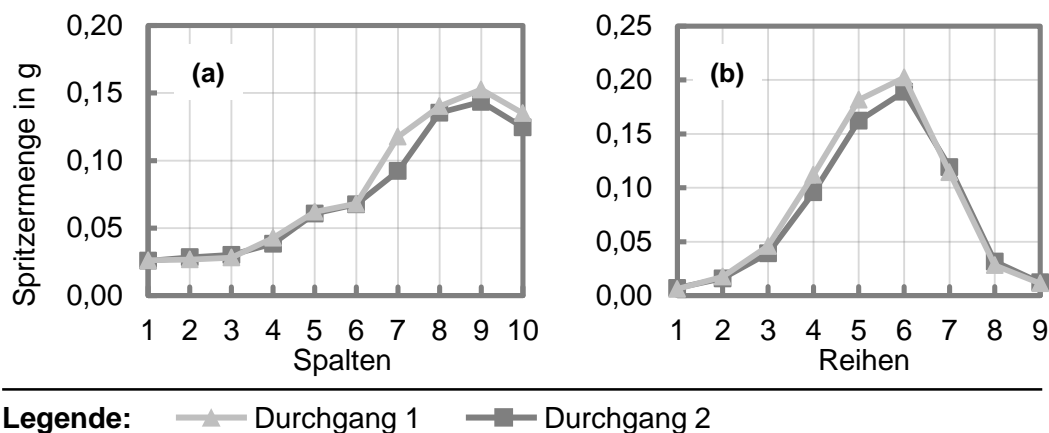


Abbildung 55: Mittelwerte der Spritzermassen der Spalten (a) und Reihen (b) der Massenprofile der beiden Durchgänge

Es zeigt sich, dass die über die Reihen und Spalten gemittelten Werte in den beiden Durchgängen sehr ähnlich ausfallen. Die entsprechenden Verläufe sind für je eine ausgewählte Reihe und Spalte in Abbildung 56 aufgetragen. Dazu wurden die mittlere Reihe 5 und die mittlere Spalte 6 gewählt.

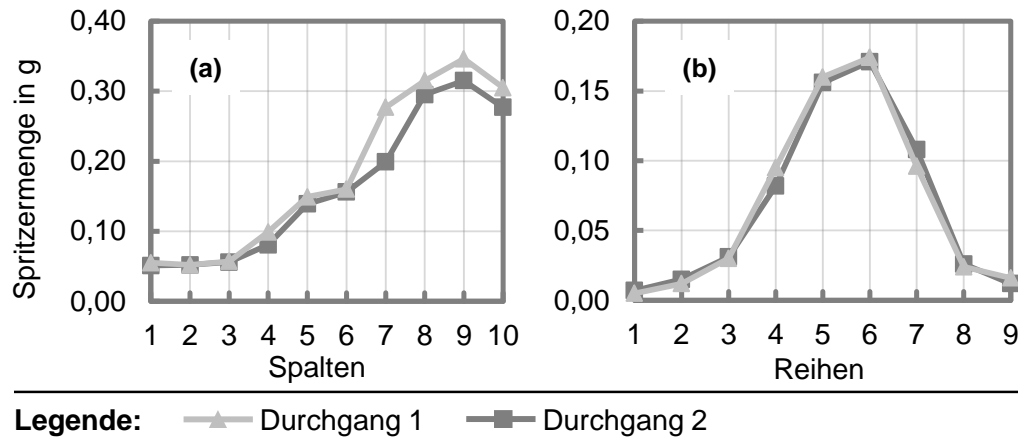


Abbildung 56: Mittlere Reihe 5 (a) und Spalte 6 (b) der Massenprofile der beiden Durchgänge

Auch bei dem Vergleich der mittleren Reihen und Spalten zeigt sich ein sehr ähnlicher Verlauf. Die gesammelte Gesamtmasse liegt jeweils bei 7,893 g im ersten Durchgang und 8,634 g im zweiten Durchgang. Dies entspricht einer Abweichung von unter 10 %. Insgesamt kann also festgestellt werden, dass sich die Ergebnisse der Kalibrierung über die beiden Wiederholungen ähnlich verhalten.

### 5.6.3 Genauigkeit der Vorhersage

In diesem Unterabschnitt wird die Vorhersagegüte des Modells anhand eines Abgleichs mit der experimentellen Realität untersucht. Dafür wird basierend auf einem Produktionsprogramm der Verlauf des Elementgehaltes einer Pulvercharge über mehrere Verarbeitungszyklen hinweg prognostiziert. Das Szenario wird parallel experimentell realisiert, so dass die Ergebnisse direkt verglichen werden können. Um den Bereich signifikanter Änderungen zu erreichen, wird dabei ein Extremfall bei der Recyclingstrategie genutzt. Es wird so viel Pulver wiederverwendet wie möglich. Aus diesem Grund wird das gesamte Restpulver im Bauraum rezykliert. Es wird die maximale vom Anlagenhersteller vorgegebene Siebmaschenweite von 75  $\mu\text{m}$  genutzt. Weiterhin wird die kollektive Alterung als Mischkonzept angewendet, da bei dieser Variante keine Verlangsamung der Alterung durch Beifügen von Neupulver auftritt. Für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieses Unterabschnitts werden Daten aus WIEDEMANN 2018 und HUSZAR 2018 verwendet.

Als Produktionsaufgabe werden 10 Baujobs vorgegeben, in denen Quader mit unterschiedlichen Höhen und gleichbleibendem Bauteilquerschnitt gefertigt werden.

Die entsprechenden geometrischen Angaben sind in Abbildung 57 aufgeführt. Die Höhen der Bauteile wird dabei so gewählt, dass das verfügbare Pulver  $m_{i,in}$  durch den jeweiligen Job gänzlich aufgebraucht und somit maximal ausgenutzt wird. Die Balkenhöhe nimmt von 120 mm kontinuierlich auf 26,75 mm ab. Somit wird in jedem Zyklus das gesamte verfügbare Pulver verarbeitet. Die Quader weisen einen gleichbleibenden Bauteilquerschnitt (50 mm x 20 mm) mit einer Fläche von 1.000 mm<sup>2</sup> auf. Dies entspricht einer Bauraumnutzung von 6,6 %. Die Pulverbefüllmenge liegt beim ersten Baujob bei 3,895 kg. Nach dem zehnten Zyklus bleiben 24,5 % der Ausgangsmasse übrig.

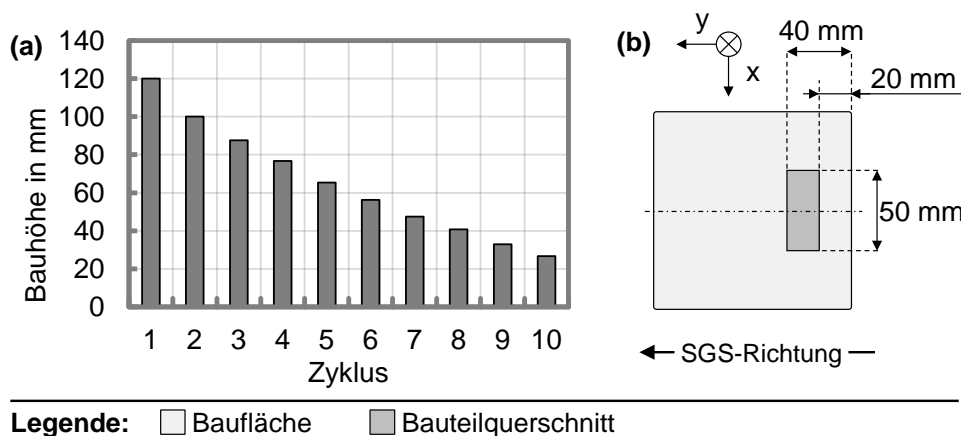


Abbildung 57: (a) Bauhöhen der Quaderbaujobs für die Bewertung der Vorhersagegüte im Rahmen der Validierung; (b) Abmessungen und Positionierung des Bauteilquerschnitts

### Abgleich von Prognose und Experiment

Da der ESUK-Anteil nicht direkt gemessen werden kann, wird der Sauerstoffgehalt als Indikator für die Änderung des Pulverzustands verwendet. Um die Übertragbarkeit der Kalibrierung zwischen Pulverchargen einer Spezifikation zu untersuchen, werden Daten aus zwei Kalibrierungen genutzt. Erstens wird eine Kalibrierung verwendet, die mit derselben Pulvercharge durchgeführt wurde wie das Experiment. Diese entspricht den Daten aus der Plausibilisierung der Kalibrierung (Unterabschnitt 5.6.1). Der mittlere Sauerstoffgehalt gemäß Abbildung 54 beträgt  $1.659 \pm 63$  ppm. Zweitens wird eine Kalibrierung genutzt, die mit einer weiteren Pulvercharge der gleichen Spezifikation ermittelt wurde. Der mittlere Sauerstoffgehalt des Spritzerunterkorns liegt bei dieser Pulvercharge bei  $1.354 \pm 79$  ppm.

Die prognostizierten Verläufe des Sauerstoffgehalts des Recyclingpulvers und die entsprechenden experimentellen Ergebnisse sind in Abbildung 58 zusammengefasst. Zur Berechnung wurde das Modell in Python implementiert. Der Zyklus 0 entspricht dem Pulver vor dem ersten Baujob. Der Sauerstoffgehalt des Ausgangszustands beträgt  $527 \pm 29$  ppm.

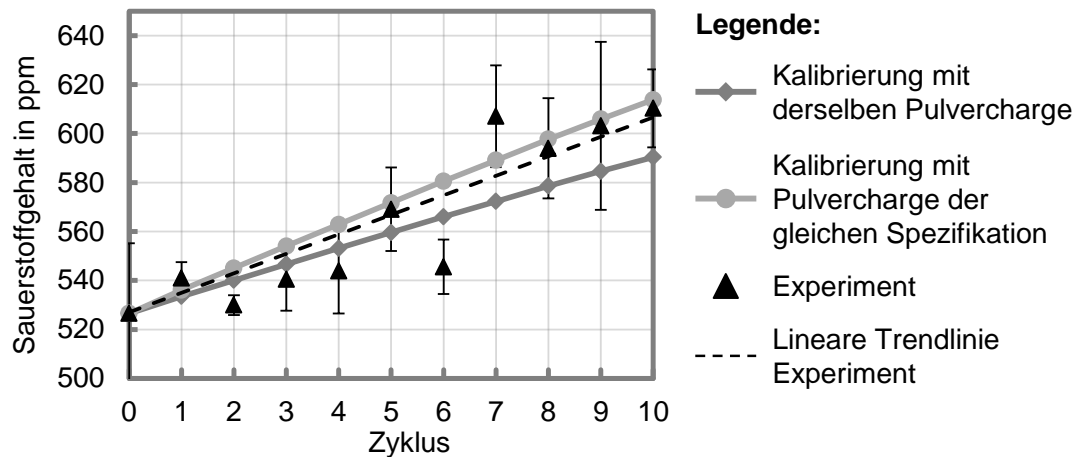


Abbildung 58: Modellierter und im Experiment gemessener Verlauf des Sauerstoffgehalts im Recyclingpulver über die Nutzungszyklen, gemessen mittels Heißgasextraktion, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messungen ( $n = 5$ )

Das Modell prognostiziert in diesem Fall für beide Kalibrierungen einen linearen Verlauf, da der Bauteilquerschnitt und die Position im Bauraum sich nicht ändern. Mit der Kalibrierung der gleichen Pulvercharge wird ein Anstieg von 12,1 % auf 590 ppm nach 10 Zyklen prognostiziert. Das Ergebnis für die Kalibrierung mit einer anderen Pulvercharge nach der gleichen Spezifikation liegt bei 16,6 % und einem absoluten Wert von 614 ppm. Der im Experiment gemessene Wert liegt mit 15,9 % und einem absoluten Wert von 610 ppm nah an beiden Vorhersagen. Beide Ergebnisse können mit Abweichungen von 3,3 % und 0,7 % zum experimentell bestimmten Wert als valide erachtet werden. Gleichzeitig gilt zu beachten, dass die zu erwartende Messungenauigkeit beim Sauerstoff aufgrund der Messmethode bei 5 % bzw. einer Abweichung von  $\pm 31$  ppm liegt. Diese Messungenauigkeit ist bei der Interpretation und weiteren Verwendung der Ergebnisse zu berücksichtigen, beispielsweise durch die Einbeziehung eines zusätzlichen Sicherheitsfaktors in der Berechnung.

---

Bei dem Verlauf der Sauerstoffwerte aus dem Experiment fällt die hohe Varianz zwischen den Zyklen auf. Diese Beobachtung deckt sich mit den experimentellen Ergebnissen aus dem Stand der Forschung und Technik (GRAINGER 2016). Die Varianz der Messungen innerhalb der Zyklen liegt mit einem durchschnittlichen Wert von 3 % im Rahmen der zu erwartenden Messgenauigkeit. Ein Erklärungsansatz könnte in der heterogenen Verteilung der Spritzer im Recyclingpulver liegen. Die Schwankungen könnten demnach auf dem Vorgehen bei der Probennahme beruhen.

Im Rahmen der Validierung wurde insgesamt festgestellt, dass der Verlauf des ESUK-Anteils und der damit verbundene Sauerstoffgehalt im Pulver durch das Modell innerhalb der Standardabweichung der Messung prognostiziert werden kann. Für eine valide Kalibrierung ist es nicht zwangsläufig erforderlich, diese mit derselben Pulvercharge durchzuführen. Auch die Kalibrierung mit einer anderen Pulvercharge der gleichen Spezifikation hat mit einer Abweichung von unter 4 % zu validen Ergebnissen geführt.

## 5.7 Evaluierung des Modells

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Validierung wird das Modell in diesem Abschnitt evaluiert. Es wird dazu die Erfüllung der gestellten Anforderungen bewertet. Weiterhin werden der Gültigkeitsbereich und die Systemgrenze des Modells reflektiert.

### 5.7.1 Erfüllung der Anforderungen

Im Hinblick auf die Anforderungen an die Modellierung kann geschlussfolgert werden, dass das Modell durch seinem Aufbau **flexibel** auf unterschiedliche LBM-Anlagen, Prozessparameter und Werkstoffe angewendet werden kann. Die größte Herausforderung besteht dabei in der Wahl der Konfiguration für die gegebenen Abmessungen im Bauraum der Anlage. Durch die formulierten Randbedingungen kann diese anwendungsspezifisch bestimmt werden. Die **Kalibrierbarkeit** des Modells konnte in den Unterabschnitten 5.6.1 und 5.6.2 gezeigt werden. Sowohl Plausibilität als auch Reproduzierbarkeit der Ergebnisse konnten im Rahmen der Validierung nachgewiesen werden. Die Kalibrierung kann ohne Veränderungen an der LBM-Anlage durchgeführt werden, was einen entscheidenden Vorteil für die praktische Umsetzbarkeit bedeutet. Auch die **Effizienz** der Modellierung kann als erfüllt gesehen werden. Der Aufwand für die Kalibrierung fällt mit einem Baujob

mit einer Fertigungsdauer von ca. zehn Stunden gering aus. Gleichzeitig hat sich bei der Validierung eine hohe Genauigkeit der Vorhersage gezeigt. Insgesamt werden die in Abschnitt 5.1 gestellten Anforderungen an das Modell erfüllt.

### **5.7.2 Reflexion und kritische Betrachtung**

Im Hinblick auf die Verwendung des Modells gilt es zu berücksichtigen, dass LBM-Anlagen teilweise runde Bauflächen nutzen. In diesem Fall ist der Berechnungsansatz geometrisch anzupassen, beispielsweise durch die Transformation in ein zylindrisches Koordinatensystem. Abgerundete Ecken der Bauplatte werden bei der verwendeten Modellierung nicht berücksichtigt. Weiterhin kann die Umsetzung der Kalibrierung dadurch limitiert werden, dass bei LBM-Anlagen zum Teil nur eine kleine Fläche für den Auffangbereich zur Verfügung steht. Dies beeinflusst die Konfiguration der Kalibrierung insoweit, dass eine höhere Anzahl an Blöcken erforderlich ist.

Die vorgestellte Vorgehensweise zur Kalibrierung ist nicht als einzige Möglichkeit zu sehen, um das für die Modellierung erforderliche ESUK-Profil zu ermitteln. Eine Simulation der Spritzerbildung und bildoptische Messverfahren bilden zwei Alternativen. Durch die Kombination einer Schmelzbadsimulation und einer Strömungssimulation im Bauraum kann die räumliche Einbringung der Spritzer bestimmt werden. Die Simulationsmodelle des Schmelzbades bilden nach aktuellem Stand der Forschung nur in geringem Maße die Entstehung von Prozessspritzern ab. Bei den bildoptischen Verfahren kann die Flugbahn der Spritzer alternativ mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmt werden. Durch die Verwendung von Thermographiekameras können die Spritzer noch einfacher vom restlichen Pulverbett unterschieden werden.

Die Bestimmung der Verteilung der Spritzereinbringung kann theoretisch auch direkt im Pulverbett vorgenommen werden. Ein Gitter oder Raster mit Zellen in der Größe des Kalibrierelements kann nach dem Baujob von oben in das Pulverbett gedrückt werden. In jeder Zelle kann über die Partikelgrößenverteilung der einzelnen Proben der lokale Anteil der Spritzer anhand des Überkornanteils bestimmt werden. Darüber kann prinzipiell auch ein Rückschluss auf die Menge des Spritzerunterkorns gezogen werden. Aufgrund der geringen messbaren Unterschiede der Partikelgrößenverteilung, die mit diesem Ansatz festgestellt wurden, ist mit einem hohen Fehler bei der Bestimmung des ESUK-Profiles zu rechnen. Daher wurde von diesem Vorgehen zur Kalibrierung abgesehen.

---

Das Vorgehen zur Kalibrierung kann grundsätzlich auch dafür genutzt werden, um die Schutzgasströmung in der Prozesskammer zu charakterisieren. Aspekte wie die Symmetrie und die Wiederholgenauigkeit gelten als relevante Einflussgrößen auf die Prozessgüte. Diese könnten mittels der Kalibrierung bestimmt und zwischen Anlagen und Strömungseinstellungen verglichen werden. Weiterhin kann der Ansatz zur Kalibrierung dafür eingesetzt werden, um Prozessparameter mit minimaler Spritzerentstehung zu entwickeln. Hierdurch wird die Einbringung von Spritzern reduziert, so dass die Alterung des Pulvers verlangsamt wird.

## **5.8 Fazit**

In diesem Kapitel wurde ein Modell vorgestellt, das die Alterung einer Pulvercharge durch die Einbringung von Prozessspritzern beim Laserstrahlschmelzen beschreibt. Auf der Baujob-Ebene wird die räumliche Einbringung der im Prozess entstehenden Spritzer in das Pulverbett abgebildet. Auf der Pulverchargen-Ebene wird ergänzend das Mischen der beteiligten Pulverzustände quantitativ beschrieben. Ein zentraler Aspekt der Modellierung besteht in der Kalibrierung des Modells. Hierzu wurde ein experimenteller Ablauf entwickelt, mit dem die räumliche Verteilung von Spritzerunterkorn ausgehend von einem Entstehungsort ermittelt werden kann. Die Modellierung wurde anschließend hinsichtlich ihrer Funktionalität validiert. Dabei wurde die Plausibilität der Ergebnisse überprüft, die Reproduzierbarkeit getestet und die Vorhersagegenauigkeit im Abgleich mit der Realität bewertet. Das Modell kann folglich dafür genutzt werden, den ESUK-Anteil einer Pulvercharge über ein beliebiges Produktionsprogramm vorherzusagen, sofern die Abmessungen des Bauraums der betrachteten LBM-Anlage die Platzierung von Auffangbehältern erlauben.

Im Hinblick auf die Qualitätssicherung beim Pulverrecycling bildet das Modell damit einen wesentlichen Baustein. Die Wirkung der betrachteten Eigenschaftsänderung auf die Bauteilqualität wird in diesem Schritt allerdings nicht berücksichtigt. Da die Bauteilqualität aus Sicht der Qualitätssicherung entscheidend ist, muss die gesamte Wirkkette betrachtet werden. Für die Bewertung eines Vorgehens zum Pulverrecycling wird das Modell daher im Folgenden in eine Methode eingebettet, die ergänzend auch die Wirkung der Änderung des Pulverzustands auf der Bauteilebene berücksichtigt.





---

## 6 Methode zur Bewertung von Pulverrecyclingstrategien

Das Ziel der Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methode zur Qualifizierung eines qualitätsorientierten Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen. Diese wird im Folgenden beschrieben und baut auf dem in Kapitel 5 entwickelten Modell auf. Abbildung 59 fasst die Grobstruktur des Kapitels zusammen.

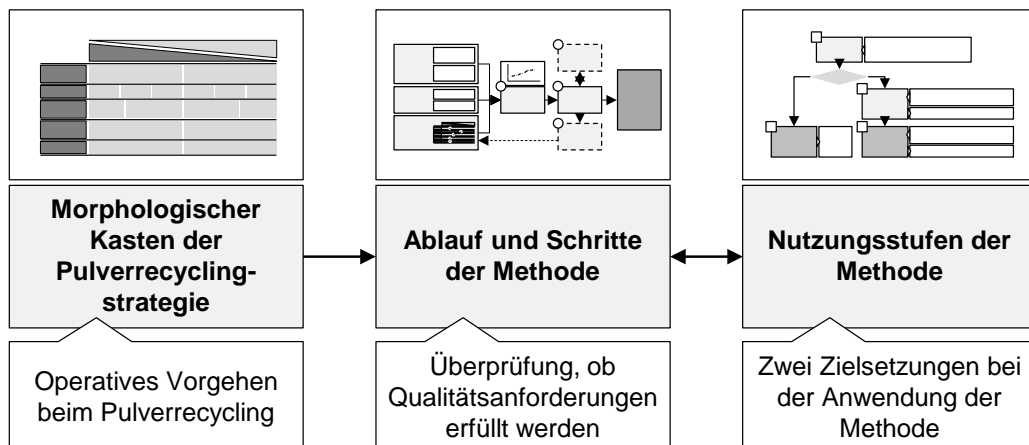


Abbildung 59: Zentrale Bausteine und Grobstruktur des Kapitel 6

Zentraler Stellhebel der Methode ist ein morphologischer Kasten der Pulverrecyclingstrategie, in dem das operative Vorgehen bei der Wiederverwendung festgelegt wird. Dieser stellt ein Input für die Methode dar. Innerhalb der Methode wird die Erfüllung von Qualitätsanforderungen für ein gegebenes Fertigungsszenario überprüft. Die Methode selber kann je nach Ausgangssituation des Anwenders auf zwei Weisen genutzt werden. Dies wird durch die zwei Nutzungsstufen verdeutlicht.

Im folgenden Abschnitt werden die Anforderungen an die Methode formuliert. Anschließend werden die zentralen Bausteine (vgl. Abbildung 59) erläutert, bevor die einzelnen Schritte der Methode weiter detailliert werden. Abschließend wird die Methode am Beispiel der Verarbeitung von AlSi10Mg-Pulver auf der LBM-Anlage SLM125HL angewendet und in Bezug auf die gestellten Anforderungen sowie hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit evaluiert.

### 6.1 Anforderungen

Es besteht aktuell weitgehend Unsicherheit darüber, in welchem Maße Pulvermaterial beim Laserstrahlschmelzen wiederverwendet werden kann.

Insbesondere die Wirkung des Recyclings auf die Bauteilqualität ist schwierig abzuschätzen, gleichzeitig aber entscheidend aus Sicht der Qualitätssicherung. An diesem Punkt setzt die entwickelte Methode an. Sie soll Anwender der Technologie dabei unterstützen, Vertrauen in das Pulverrecycling zu schaffen und situationsspezifisch die richtige Pulverrecyclingstrategie zu wählen. Der Zielzustand beim Pulverrecycling besteht darin, eine Pulvercharge in höchstmöglichem Umfang wiederzuverwenden, ohne dabei die Bauteilqualität zu gefährden. Die Bauteilqualität stellt die zentrale Bewertungsdimension dar. Der Zweck der Methode besteht in der Entwicklung und Bewertung von Pulverrecyclingstrategien beim Laserstrahlschmelzen. Dafür wird im Rahmen der Methode ein spezifischer Anwendungsfall betrachtet, der eine konkretes Produktionsprogramm sowie spezifische Anforderung an die Bauteilqualität beinhaltet.

Die Anforderungen an die Methode ergeben sich aus der Zielsetzung dieser Arbeit sowie dem in Abschnitt 3.5 abgeleiteten Handlungsbedarf. Es kann zwischen funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen unterschieden werden.

### 6.1.1 Funktionale Anforderungen

- **Bewertung von Pulverrecyclingstrategien:** Ergebnis der Methode ist die Bewertung der Einhaltung eines vorgegebenen Qualitätsniveaus bei der Anwendung eines Vorgehens zum Pulverrecycling.
- **Anpassbarkeit auf Qualitätsniveaus:** Da Anforderungen an die Bauteilqualität je nach Anwendung stark variieren können, sollte die Methode anpassbar sein an die vorgegebenen Kriterien, im Besonderen für die Bauteilqualität.
- **Einbeziehung des Produktionsprogramms:** Bei der Bewertung der Pulverrecyclingstrategie gilt es die geplante Produktionsaufgabe zu berücksichtigen, da diese das Alterungsverhalten des Pulvers beeinflusst und in der Praxis stark variieren kann. Das Produktionsprogramm umfasst die geometrischen Informationen über zu fertigende Bauteile und Baujobs.
- **Abbildung des Effektes Spritzereinbringung:** Da sich dieser Effekt in Kapitel 4 als maßgeblich für die Pulveralterung beim Laserstrahlschmelzen herausgestellt hat, ist dieser im Hinblick auf mögliche Änderungen des Pulverzustands zu berücksichtigen.

- 
- **Bereitstellung von Optimierungsmaßnahmen:** Für den Fall, dass eine Pulverrecyclingstrategie die geforderte Qualität gefährdet, sollte die Methode konkrete Stellhebel aufzeigen, um den Grad des Recyclings gezielt einzuschränken und somit bestimmte Alterungszustände zu vermeiden.

### 6.1.2 Nichtfunktionale Anforderungen

- **Flexibilität hinsichtlich des Ausgangswissens des Anwenders:** Die Methode sollte unabhängig vom Ausgangswissen des Anwenders über den Einfluss des Recyclings auf die Bauteilqualität sein. Sie sollte auch dann praktikabel sein, wenn noch kein Wissen zur Verarbeitung des betrachteten Werkstoffs mittels Laserstrahlschmelzen vorhanden ist. Dies ist besonders für die Planung der LBM-Produktion relevant.
- **Modularisierbarkeit:** Es sollte die Möglichkeit zur Beeinflussung des Aufwands durch den Anwender bestehen. Damit kann der Zielkonflikt zwischen Ergebnisqualität und Genauigkeit der Aussage anwendungsspezifisch gelöst werden.
- **Praxistauglichkeit:** Die praktische Umsetzbarkeit der Methode in der industriellen Praxis sollte gegeben sein. Sie sollte durch den Anwender selbst und ohne Veränderungen an der LBM-Anlage durchführbar sein.

Insgesamt soll die Methode Anwender des Laserstrahlschmelzens dabei unterstützen, eine qualitätsgesicherte Pulverrecyclingstrategie zu entwickeln. Die Erfüllung der gestellten Anforderungen wird anhand der Anwendung der Methode evaluiert.

## 6.2 Gültigkeitsbereich und Annahmen

Die Methode bezieht die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln ein und beruht auf folgenden Annahmen:

- Es wird von einer Monomaterialverarbeitung mittels Laserstahlschmelzen ausgegangen.
- Ein Anwendungsfall besteht aus der spezifischen Kombination einer Anlage, eines Prozessparametersatz und eines Werkstoffs mit einer Pulverspezifikation.

- Es wird der wirtschaftliche Idealfall angestrebt, bei dem das Pulver möglichst vollständig wiederverwendet wird, ohne die Bauteilqualität dabei unter ein vorgegebenes Niveau zu verschlechtern.
- Pulverchargen einer Spezifikation verhalten sich gleich in ihrem Alterungsverhalten und hinsichtlich der Wirkung von Zustandsänderungen durch die Wiederverwendung auf die Bauteileigenschaften. Die Übertragbarkeit der Kalibrierung des Modells zwischen Pulverchargen der gleichen Spezifikation wurde in Abschnitt 5.6 gezeigt.
- Es wird davon ausgegangen, dass die vermeidbaren Änderungseffekte, insbesondere durch den Kontakt mit Umgebungsfeuchte, durch die in Unterabschnitt 4.3.1 aufgestellten technischen Maßnahmen vermieden werden.

### 6.3 Morphologischer Kasten der Pulverrecyclingstrategie

Das zentrale Gestaltungselement in der Methode liegt in der Pulverrecyclingstrategie. Diese gibt das operative Vorgehen beim Pulverrecycling vor und umfasst vier Gestaltungsebenen, in denen konkrete Umsetzungsvarianten definiert sind. Das Pulverrecycling kann somit, wie in Abbildung 60 zusammengestellt, als morphologischer Kasten verstanden werden (LINDEMANN 2016).

	Recyclinggrad			Risikominimierung		
Umgang mit Bauraumpulver	Wiederverwendung des Bauraumpulvers			Entsorgung des Bauraumpulvers		
Siebung	80 µm	75 µm	71 µm	63 µm	56 µm	53 µm
Limitierung	Keine Beschränkung	Hohes Zykluslimit (z. B. 30)		Mittleres Zykluslimit (z. B. 10)		Zykluslimit 1
Bauteil-anordnung	Optimiert für minimale Spritzereinbringung			beliebig		
Mischstrategie	Kollektive Alterung			Kontinuierliches Auffrischen		

Abbildung 60: Morphologischer Kasten der Pulverrecyclingstrategie beim Laserstrahlschmelzen

Die Varianten für ein möglichst uneingeschränktes Recycling (hoher Recyclinggrad) sind links und die Gestaltungsoptionen für eine begrenzte Wiederverwendung rechts einsortiert. Die Maschenweiten beim Sieben entsprechen den Größenstufen nach ISO 3310-1 und liegen im Bereich der in Unterabschnitt 3.4.1 zusammengefassten Anwendungen. Die Beispiele bei der Zyklengrenzung orientieren sich an NASA 2017A. Die Varianten in den Gestaltungsebenen können unabhängig voneinander variiert werden.

## 6.4 Struktur und Ablauf der Methode

### 6.4.1 Übersicht

Die Methode umfasst zwei obligatorische und zwei optionale Schritte, die im Folgenden genauer beschrieben werden. Der schematische Ablauf der Methode ist in Abbildung 61 veranschaulicht. Die optionalen Schritte sind mit gestrichelten Linien dargestellt. Diese werden je nach Ergebnis des vorgelagerten Schritts durchlaufen.

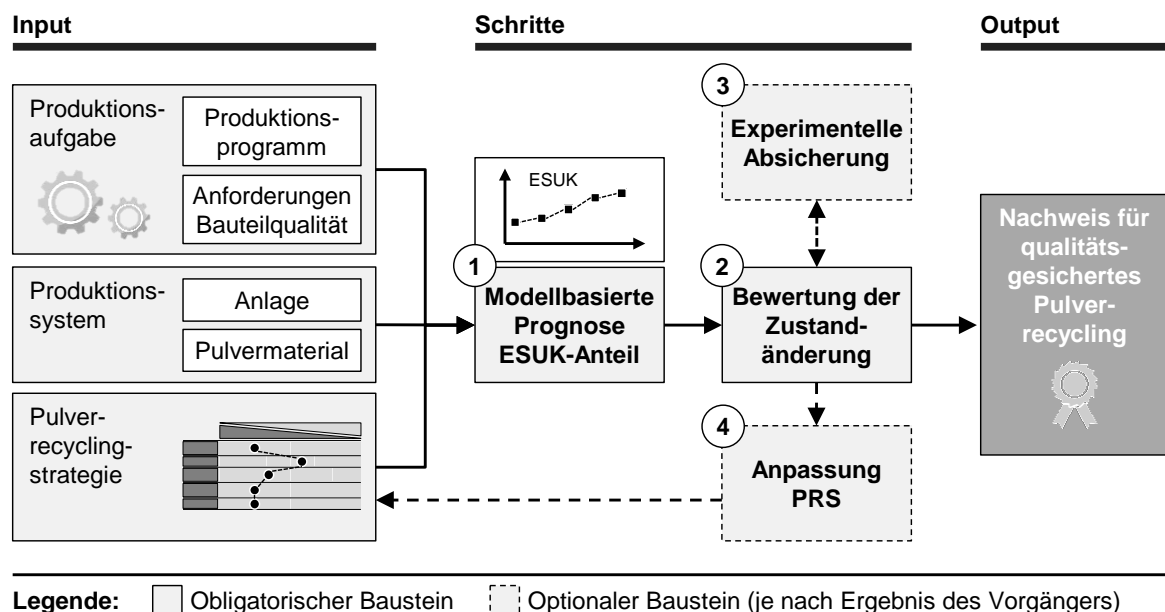


Abbildung 61: Ablauf der Methode zur Bewertung von Pulverrecyclingstrategien

Die Produktionsaufgabe bildet eine Eingangsgröße der Methode. Diese umfasst die geplanten Baujobs sowie bauteilspezifische Qualitätsanforderungen. Der Anwendungsfall definiert sich weiterhin über das verwendete Produktionssystem,

das aus der LBM-Anlage und dem verwendeten Pulvermaterial besteht. Der dritte Ausgangsbaustein ist die geplante Pulverrecyclingstrategie, die das operative Vorgehen zum Pulverrecycling vorgibt (vgl. Abschnitt 6.3).

Im **ersten Schritt** der Methode wird unter Verwendung der Modellierung (vgl. Kapitel 5) der maximale ESUK-Anteil des Pulvers im geplanten Anwendungsfall prognostiziert. Dieser tritt in der Regel am Ende der Lebenszeit einer Pulvercharge auf. Im **zweiten Schritt** wird die erwartete Zustandsänderung aus Qualitätssicht evaluiert. Die Bewertung kann basierend auf dem Abgleich der prognostizierten Pulvereigenschaften (z. B. chemische Zusammensetzung) mit vorgegebenen Grenzwerten oder Materialstandards vorgenommen werden. Sind entsprechende Vorgaben nicht vorhanden, kann die Bewertung durch eine experimentelle Absicherung (**Schritt drei**) unterstützt werden. Hierbei wird der Einfluss des maximalen ESUK-Anteils auf die Bauteilanforderungen experimentell bestimmt. Fällt die Bewertung positiv aus, kann die angenommene Pulverrecyclingstrategie freigegeben werden. Fällt die Bewertung hingegen negativ aus, gilt es die Pulverrecyclingstrategie im Rahmen des **vierten Schritts** anzupassen. In diesem Schritt wird das Ausmaß des Recyclings systematisch und gezielt eingeschränkt. Die Wirkung der einzelnen Maßnahmen wird mittels des Modells quantifiziert. Mit dem vierten Schritt bildet sich ein Kreislauf, der solange durchlaufen werden kann, bis das vorgegebene Qualitätsniveau sichergestellt ist.

### 6.4.2 Nutzungsstufen

Die Methode ist nach der in Abbildung 62 dargestellten Logik anzuwenden. Es werden zwei Nutzungsstufen unterschieden. In beiden Stufen wird die dargelegte Methode durchlaufen, jedoch mit unterschiedlichen Zielstellungen. Nach der ersten Stufe stellt sich heraus, ob die zweite Stufe notwendig ist.

Als Ausgangspunkt bei der Anwendung der Methode wird der größtmögliche Umfang des Pulverrecyclings vorgesehen. Dieser bildet den wirtschaftlichen Idealzustand, sofern die Bauteilqualität erfüllt ist. Ist dies nicht der Fall, ist die Pulverrecyclingstrategie situationsspezifisch anzupassen

Die Methode wird in den beiden Stufen jeweils mit unterschiedlichen Eingangsgrößen und Zielstellungen durchlaufen. In der **ersten Stufe (S1)** wird die Methode genutzt, um anhand eines Extremfalls zu überprüfen, ob ein maximales Pulverrecycling angewendet werden kann. Dabei werden die Schritte 1 bis 3 der Methode durchlaufen. Die Eingangsgrößen werden dazu als Extremfälle gewählt.

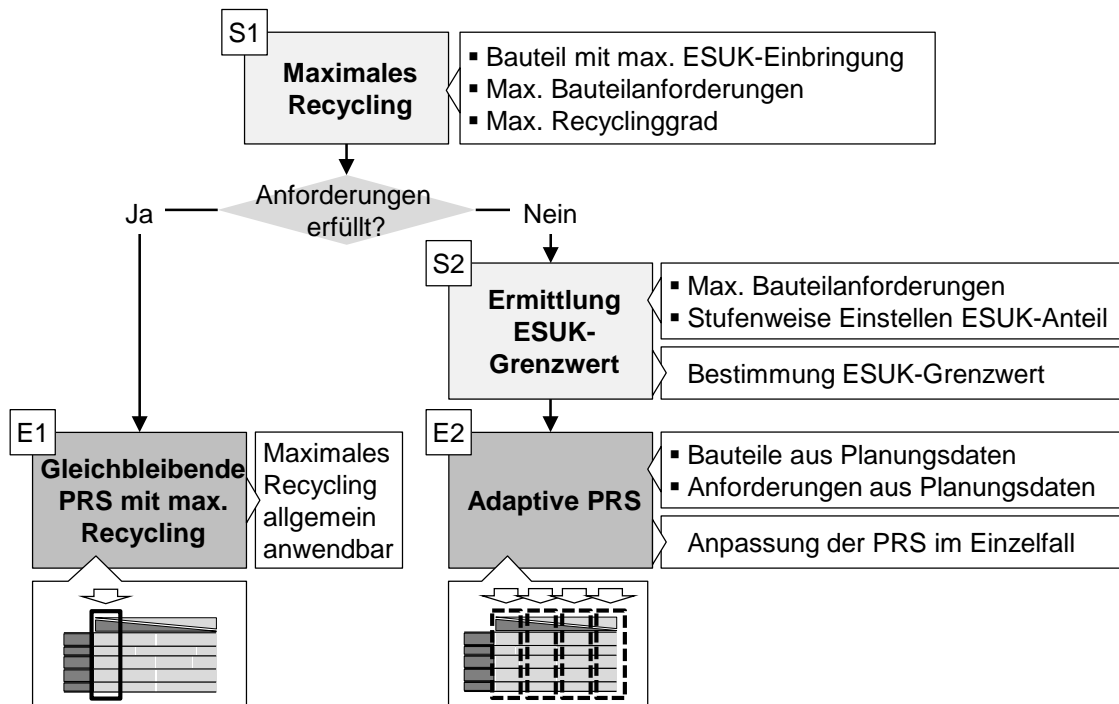


Abbildung 62: Flussdiagramm der Nutzungsstufen der Methode (S1, S2) und möglicher Ergebnisse (E1, E2)

Es wird von einem Bauteil mit maximaler Einbringung von Prozessspritzern und maximalen Bauteilanforderungen ausgegangen. Weiterhin wird die Pulverrecyclingstrategie angenommen, die einen höchstmöglichen Recyclinggrad bietet. Zeigt sich in diesem Fall, dass alle Anforderungen erfüllt werden, kann das maximale Recycling allgemein und für sämtliche Bauteile mit den betrachteten Anforderungen angewendet werden. Dies entspricht dem Ergebnis E1 (gleichbleibende PRS). Werden die Anforderungen nicht erfüllt, wird weiter in der **zweiten Stufe (S2)** vorgegangen. Dabei wird die Methode angewendet, um einen ESUK-Grenzwert für die betrachtete Anwendung zu ermitteln. Dazu wird der ESUK-Anteil bei der experimentellen Absicherung stufenweise variiert und für diese ESUK-Stufen die Erfüllung der Bauteilanforderungen überprüft. Somit wird ein maximal tolerierbarer ESUK-Anteil ermittelt. Ist dieser ESUK-Grenzwert bekannt, kann die Pulverrecyclingstrategie präskriptiv für ein konkretes Produktionsprogramm so angepasst werden, dass der Wert im konkreten Fall nicht überschritten wird. Die PRS wird dazu anhand definierter Maßnahmen systematisch auf den maximalen ESUK-Gehalt eingestellt. Dieser Zustand der kontinuierlichen Bewertung und PRS-Anpassung stellt das Ergebnis 2 dar (Adaptive PRS).

### **6.4.3 Detaillierung der Schritte**

Die vier Schritte der Methode werden in diesem Unterabschnitt genauer beschrieben.

#### **6.4.3.1 Modellbasierte Prognose des ESUK-Anteils**

Für die Prognose des Anteils eingebrachter Prozessspritzer in die betrachtete Pulvercharge wird das Modell aus Kapitel 5 genutzt. Für die vorliegende Kombination aus LBM-Anlage und Pulvermaterial wird das Modell experimentell kalibriert. Bei der Modellierung wird das geplante Produktionsprogramm einbezogen. Als Ergebnis dieses Schritts wird der prognostizierte Verlauf des ESUK-Anteils ausgegeben, bei dem insbesondere der Maximalgehalt für den folgenden Schritt von Bedeutung ist.

#### **6.4.3.2 Bewertung**

Das zentrale Kriterium bei der Bewertung besteht in der Bauteilqualität. Im Rahmen dieses Schrittes gilt es zu entscheiden, ob die maximal zu erwartende ESUK-Konzentration eine negative Wirkung auf die Bauteilqualität haben kann. Es gilt dabei die Unschärfe bei der Modellierung zu berücksichtigen. Daher ist ein Sicherheitsfaktor zu verwenden, mit dem der maximal prognostizierte ESUK-Anteil multipliziert wird. Für den ESUK-Anteil direkt existiert kein allgemeiner Grenzwert. Grundlage für die Bewertung können hingegen jegliche Materialstandards, Spezifikationen oder Grenzwerte für die betroffenen Pulvereigenschaften bilden. Diese betreffen die Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente und die Partikelgrößenverteilung, für die teilweise Vorgaben vorliegen (z. B. ASTM F3001-14). Aufgrund des vergleichsweise geringen Erfahrungswissens in der industriellen Nutzung der Technologie liegen nur wenige Richtwerte vor, um die Wirkung dieser Änderung auf die Bauteilqualität beurteilen zu können. Ist keine entsprechende Entscheidungsbasis verfügbar, ist die Wirkung der Änderung auf die spezifisch geforderte Bauteileigenschaft im Rahmen der experimentellen Absicherung (vgl. Unterabschnitt 6.4.3.3 bzw. Schritt 3) zu bestimmen.

Die Bewertung kann zwei Ergebnisse liefern: Falls der maximal zu erwartende ESUK-Anteil als unkritisch bewertet wird, kann die Pulverrecyclingstrategie freigegeben werden. Ist dies nicht der Fall, gilt es das Vorgehen beim Recycling im Rahmen des Schritts 4 bzw. der Nutzungsstufe 2 anzupassen.



### 6.4.3.3 Experimentelle Absicherung

Das Ziel dieses Schritts besteht in der experimentellen Überprüfung vorgegebener Bauteileigenschaften bei dem maximal zu erwartenden ESUK-Anteil. Die zu überprüfenden Werkstoffeigenschaften gibt dabei die Anwendung des Bauteils bzw. die Berechnungs- oder Entwicklungsabteilung vor. Hierbei sind die Lastfälle und Nutzungsbedingungen in der Anwendung ausschlaggebend. Bei heterogenen Bauteilprogrammen bietet es sich an, allgemeingültige Kennwerte zu bestimmen, die sich bei der Qualitätssicherung im Rahmen des Laserstrahlschmelzens etabliert haben. Dazu zählen die Dichte, Zugfestigkeit, Dauerschwingfestigkeit und Kerbschlagbiegefestigkeit. Es kann dabei die Positionierung der Proben im Bauraum unterschieden werden, um die Positionsabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Das detaillierte Vorgehen in diesem Schritt ist in Abbildung 63 veranschaulicht. Es gliedert sich in drei Schritte.

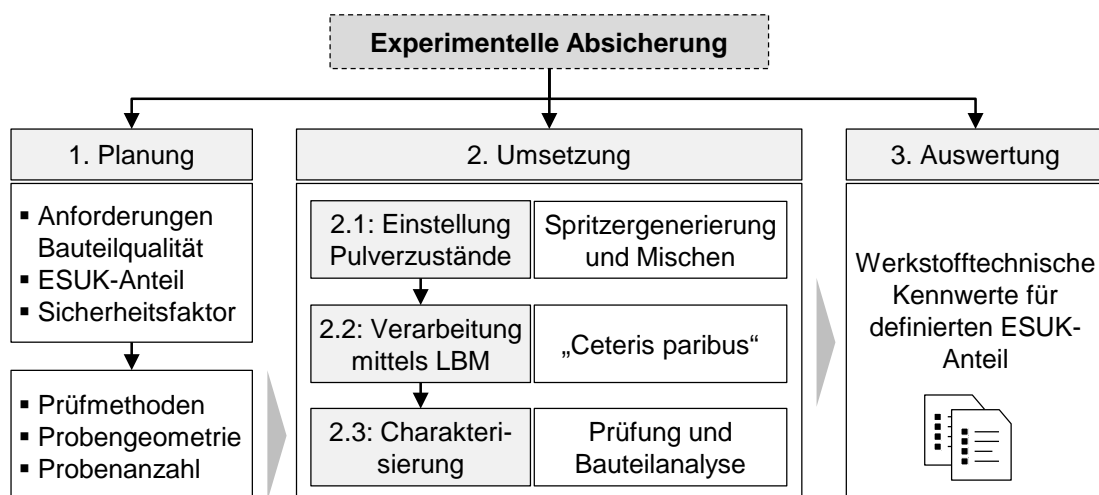


Abbildung 63: Vorgehen bei der experimentellen Absicherung der Bauteileigenschaften bei gegebenem ESUK-Anteil

Im Rahmen der Versuchsplanung werden eingangs die Prüfmethoden und Probekörper aus den Anforderungen an die Bauteilqualität abgeleitet. Es besteht ein Zielkonflikt zwischen dem Aufwand der experimentellen Absicherung und der statistischen Zuverlässigkeit der Aussage. Gerade die Probenanzahl hat einen direkten Einfluss auf den Aufwand in der Bauteilprüfung und gleichzeitig die Aussagekraft der Ergebnisse. Diese ist vom Anwender festzulegen.

Bei der Wahl der Probekörper ist im Sinne der Effizienz der Methode auf eine geringe Bauhöhe zu achten. Da sie den Pulververbrauch bestimmt und das

verwendete Pulver aufwendig in einen Zielzustand zu versetzen ist, bietet sich hier ein großer Hebel für den experimentellen Aufwand. Dies betrifft beispielsweise die Orientierung von länglichen Probekörpern. Hier kann eine wirtschaftliche Herangehensweise darin bestehen, liegende Proben zu fertigen und deren Eigenschaften mit Aufschlägen auf andere Probenorientierungen umzurechnen.

Der zweite Schritt betrifft die Umsetzung der Versuche. Für die Einstellung des ESUK-Gehalts sind gezielt Prozessspritzer zu generieren und zu sammeln. Es können auch Spritzer verwendet werden, die ohnehin bei der Fertigung von beliebigen Baujobs anfallen. Dabei gilt es darauf zu achten, dass der maximale ESUK-Anteil aus der modellbasierten Prognose mit einem Sicherheitsfaktor versehen und somit erhöht wird. Aus dem bisherigen Verlauf der Arbeit kann geschlossen werden, dass für die gezielte Generierung eine möglichst große Bauteilquerschnittsfläche vorzusehen ist, bei der die Spritzer aber nicht in das Bauteil selbst eingebracht werden. Die abgelagerten Spritzer neben der Baufläche können gesiebt und anschließend gewogen werden. Ist die erforderliche Spritzermenge erzeugt, kann diese mit Pulver des Ausgangszustands im gezielten Verhältnis gemischt und homogenisiert werden. Mit dem resultierenden Pulverzustand werden die Testkörper auf dem gegebenen LBM-Produktionssystem gefertigt. Dabei sind Änderungen weiterer Einflussgrößen auf das Prozessergebnis zu vermeiden (*ceteris-paribus*-Prinzip). Anschließend werden die Proben im Rahmen der Charakterisierung geprüft und die relevanten Bauteileigenschaften analysiert. Die Auswertung der Daten bildet die Grundlage für die folgende Bewertung. Der Einfluss des ESUK-Anteils kann bei diesem Vorgehen auch in mehreren Stufen ermittelt werden. Dieser Ansatz ist in der Stufe 2 gemäß Abschnitt 6.4.2 vorgesehen. Auf diesem Wege kann die Wirkung auf die Bauteileigenschaften als Funktion des ESUK-Gehalts angenähert werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Ergebnis zwischen Werkstoffen, Anlagen und verwendeten Parametern unterscheiden kann. Daher ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus diesem Schritt nicht sicher zu gewährleisten.

### **6.4.3.4 Anpassung der Pulverrecyclingstrategie**

Das Ziel dieses Schritts besteht darin, die Pulverrecyclingstrategie so anzupassen, dass der maximale auftretende ESUK-Anteil unter einem festgelegten Grenzwert bleibt. Der Schritt wird ausschließlich in der zweiten Nutzungsstufe durchlaufen. Im Folgenden werden anhand der Dimensionen der Pulverrecyclingstrategie Maßnahmen beschrieben, um den ESUK-Anteil zu senken. Die Wirksamkeit hängt

---

dabei von der konkreten Anwendung ab. Es sind auch die zusätzlichen Pulververluste zu berücksichtigen, die durch die Maßnahmen hervorgerufen werden. Die Reduzierung des ESUK-Anstiegs und die mit der Maßnahme verbundenen Pulververluste können anhand der Modellierung kalkuliert werden. Generell sollten die wirksamsten und effizientesten Schritte priorisiert werden.

- 1. Entsorgung von Bauraumpulver:** Diese Pulverteilmenge weist eine sehr hohe ESUK-Konzentration auf und hat somit einen großen Einfluss auf den ESUK-Anteil des Recyclingpulvers. Wird diese Pulvermenge entsorgt statt wiederverwendet, kann darüber der ESUK-Anteil stark reduziert werden. Die Maßnahme kann einfach umgesetzt werden, indem der Bediener diese Pulvermenge beim Ausbauen des Baujobs entsorgt (z. B. durch Absaugen).
- 2. Feinere Siebmaschenweite:** Durch die Nutzung einer feineren Maschenweite beim Sieben kann ein größerer Anteil der eingebrachten Prozessspritzer aus dem Recyclingpulver entfernt werden. Nachteile der Maßnahme bestehen darin, dass sich die Siebdauer erhöht und ein häufigeres Reinigen des Siebs erforderlich wird. Wie in Unterabschnitt 3.4.1 beschrieben werden Maschenweiten in standardisierten Größenstufen genutzt. Die Maßnahme ermöglicht daher nur diskrete Anpassungen.
- 3. Limitierung der Zyklen:** Über diese Maßnahme kann vorgegeben werden, dass das Pulver nicht über eine bestimmte Zyklenzahl hinweg verarbeitet wird. In der industriellen Praxis wird diese Maßnahme häufig verwendet.
- 4. Bauteilanordnung:** Die Bauteilanordnung beeinflusst die Menge der eingebrachten Prozessspritzer im Baujob. Gerade bei einem heterogenen Produktionsprogramm bewirkt eine Verschiebung von massiven Bauteilen hin zum SGS-Auslass, dass ein besonders großer Anteil der Spritzer im Zwischenraum oder Filter landet.
- 5. Mischkonzept:** Durch die Umstellung von der kollektiven Alterung auf das kontinuierliche Auffrischen kann die Alterung des Pulvers verlangsamt werden. Je nach Zumischverhältnis des Neupulvers nimmt der ESUK-Anteil direkt ab. Diese Maßnahme ermöglicht eine kontinuierliche Einflussnahme auf den ESUK-Anteil.

Auch wenn aus dem Stand der Forschung und Technik bekannt ist, dass eine Änderung der Prozessparameter die Entstehung von Prozessspritzern beeinflusst, wird von dieser Maßnahme abgesehen. Die Qualifizierung von neuen

Prozessparametern stellt einen enormen Aufwand dar und deren Anpassung im laufenden Betrieb kann aus Zulassungsgründen untersagt sein (KRAUSS 2017).

Insgesamt kann anhand der beschriebenen Maßnahmen der maximale ESUK-Anteil gezielt reduziert werden. Die Wirkung der einzelnen Maßnahmen sowie die zusätzlichen Verluste werden durch die Modellierung quantifiziert. Die Methode wird im folgenden Abschnitt angewendet und evaluiert.

### **6.5 Anwendung der Methode**

In diesem Abschnitt wird die Methode angewendet. Die Ergebnisse der Methode bilden die Basis für die anschließende Evaluierung. Es werden beide Nutzungsstufen abgedeckt. Erstens wird im Sinne der Stufe 1 ein Extremfall betrachtet. Anschließend werden in der Stufe 2 Maßnahmen zur Optimierung der Pulverrecyclingstrategie abgeleitet. Für beide Anwendungsbeispiele wird die Referenzanwendung gemäß Unterabschnitt 4.2.1 genutzt. Dabei wird der Werkstoff AlSi10Mg auf einer industriellen LBM-Anlage SLM125HL verarbeitet.

#### **6.5.1 Anwendungsbeispiel Nutzungsstufe 1**

Bei der Nutzung der Methode in der ersten Stufe besteht das Ziel darin, anhand eines Extremfalls nachzuweisen, dass Pulverrecycling in vollem Ausmaß angewendet werden kann. Es wird die Pulverrecyclingstrategie mit dem höchstmöglichen Wiederverwendungsgrad genutzt. Das Bauraumpulver wird daher rezykliert. Es wird der maximale vom Anlagenhersteller vorgegebene Siebdurchmesser von 75  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Wiederverwendung wird nicht über Zyklen beschränkt. Als Mischkonzept wird die kollektive Alterung verwendet, bei der die Charge nicht aufgefrischt wird. Weiterhin wird ein Produktionsprogramm gewählt, das eine maximale Alterung bedingt. Dazu wird die in Unterabschnitt 5.6.3 für die Validierung des Modells genutzte Quadergeometrie verwendet, bei dem nahezu keine Spritzer im SGS-Auslass landen, so dass nahezu alle entstehenden Prozessspritzer in das Recyclingpulver gelangen.

Für das Anwendungsfallbeispiel wird die Anforderung an die Bauteilqualität gestellt, dass die statische und dynamische Festigkeit der konventionell verarbeiteten Legierung erreicht wird. Genauer bedeutet dies gemäß DIN EN 1706 für die Gusslegierung AlSi10Mg eine minimale Dehngrenze von 220 MPa, eine minimale Zugfestigkeit von 260 MPa und eine minimale Bruchdehnung von 2,5 %. Als Vergleichswerte werden die höchsten Grenzwerte für Sand- und Kokillenguss

---

im Zustand wie gegossen und wärmebehandelt verwendet. Eine Dauerfestigkeit des Materials wird ab einer Lastspielzahl von  $10^7$  Zyklen angenommen. Die minimale Oberspannung liegt für gegossene Aluminiumlegierungen zwischen 80 MPa und 90 MPa (OSTERMANN 2014, DIN EN 1706, BRAESS & SEIFFERT 2005, BUCHBINDER ET AL. 2010). Diese Werkstoffkennwerte stellen die Anforderungen an den additiv gefertigten Werkstoff dar.

### **Modellbasierte Prognose des ESUK-Anteils**

Die Modellierung des ESUK-Anteils für diesen Anwendungsfall wurde in Unterabschnitt 5.6.3 beschrieben. Der maximale ESUK-Anteil nach 10 Zyklen liegt zwischen 7,7 % und 10,5 %. Aufgrund des gleichbleibenden Bauteilquerschnitts und der gleichen Position des Bauteils zeigt sich ein linearer Anstieg. Der prognostizierte Sauerstoffgehalt liegt zwischen 12,1 % und 16,6 %. In diesen Bereich fällt mit 15,9 % auch der tatsächlich gemessene Wert.

### **Bewertung**

Zur Berücksichtigung der Unschärfe des Modells wird ein Sicherheitsfaktor verwendet. Dieser orientiert sich an der Varianz der Messwerte der Kalibrierung und wird mit einem Wert von 2 berechnet. Dabei wird auch einbezogen, dass die verwendete Geometrie nicht das absolute Maximum der Spritzereinbringung hervorruft. Demnach wird für die experimentelle Absicherung von einem maximalen ESUK-Gehalt von 20 % ausgegangen. Für den ESUK-Anteil direkt bestehen keine Grenzwerte. Die resultierende Änderung des Sauerstoffgehalts beträgt ca. 30 %. Auch wenn vielfach von einem negativen Einfluss eines zu hohen Sauerstoffgehalts in AlSi10Mg ausgegangen wird, liegt kein standardisierter Grenzwert für diese Pulvereigenschaft vor. Daher ist eine experimentelle Absicherung erforderlich, um die Wirkung der maximalen Alterung auf die Bauteileigenschaften zu überprüfen.

### **Experimentelle Absicherung**

Für den berechneten maximalen Alterungszustand mit einem ESUK-Gehalt von 20 % wird die Erfüllung der Anforderungen an die Bauteilqualität untersucht. Es werden Prozessspritzer generiert und einem Pulver des Ausgangszustands im Verhältnis 1:4 zugemischt. Anschließend werden Probekörper zur Untersuchung der statischen und dynamischen Festigkeit hergestellt und geprüft. Für das Verständnis der Wirkung des ESUK-Anteils auf die Bauteileigenschaften werden zusätzlich Proben aus dem Ausgangszustand (Neupulver) und mit 10 % ESUK-Anteil

analysiert. Für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieses Unterabschnitts werden Daten aus PAUL 2018 verwendet.

Anforderung 1: Dynamische Festigkeit

Für die Untersuchung der statischen und dynamischen Festigkeit werden Rundproben gemäß ASTM E466-15 mit einer Länge von 95 mm und einem effektiven Durchmesser von 5,5 mm verwendet. Um den Aufwand zur Durchführung der Versuche zu reduzieren werden liegende Proben gefertigt. Durch die damit verbundene geringe Bauhöhe wird der Aufwand zur gezielten Spritzergenerierung drastisch verringert. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Werte für stehende Proben ca. 25 MPa niedriger ausfallen als die von liegenden Proben (BUCHBINDER ET AL. 2010). Die Proben werden im wie gebauten Zustand gemessen. Die Dauerschwingversuche wurden nach ASTM E466-15 und bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 64 aufgetragen.

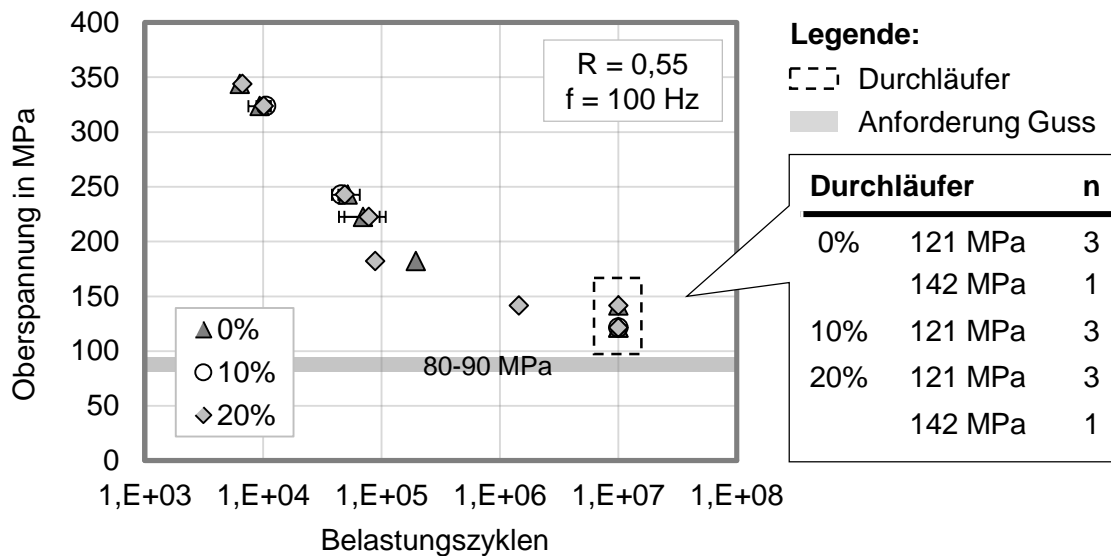


Abbildung 64: Dauerschwingfestigkeit für Neupulver (0 % ESUK), 10 % und 20 % ESUK-Anteil, Fehlerindikator: ± 1-Sigma-Standardabweichung der Messungen (n = 3 Proben)

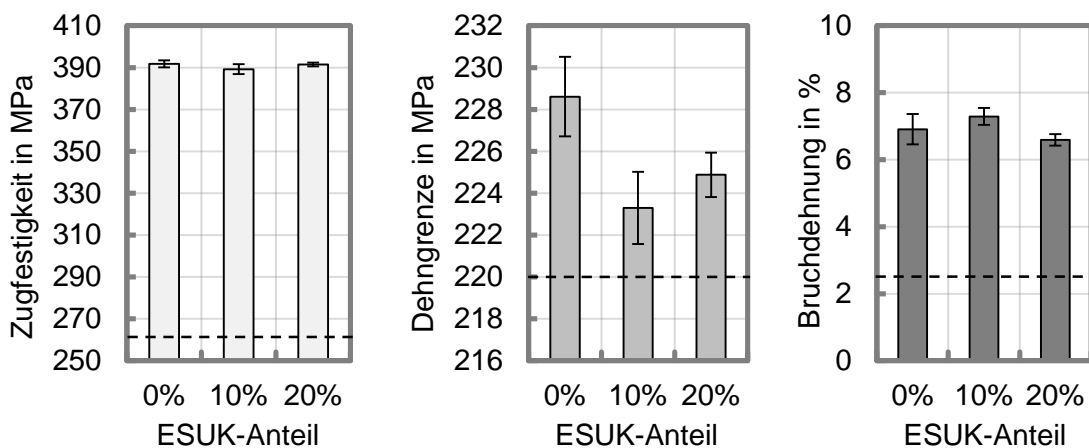
Es zeigt sich, dass die Proben aus allen drei Zuständen bei einer Spannung von 121 MPa über die 10<sup>7</sup> Lastspiele nicht versagen. Sie bilden somit Durchläufer. Dabei wurden 3 Proben pro Zustand gemessen. Somit liegt die Dauerfestigkeit bei allen drei ESUK-Konzentrationen über dem geforderten Niveau, auch wenn eine Verringerung um 25 MPa für stehende Proben berücksichtigt wird. Bei 141 MPa laufen jeweils eine Probe mit 0 % und eine mit 20 % ESUK-Anteil bei 10<sup>7</sup>

Lastspielen durch. Eine der beiden Proben mit 20 % versagen bei dieser Spannung nach 1,44 Mio. Zyklen.

Die Verläufe der drei Kurven verhalten sich ähnlich, vor allem im Spannungsbereich von ca. 222 MPa bis 344 MPa. Die größten Unterschiede zwischen den Zuständen zeigen sich bei Oberspannungen zwischen 141 MPa und 182 MPa. Hier weisen die Proben mit 20 % ESUK-Anteil eine geringfügig niedrigere Dauerfestigkeit auf und versagen früher als die Proben aus Neupulver. Insgesamt erfüllen alle drei Zustände die Anforderung.

### Anforderung 2: Statische Festigkeit

Zur Reduzierung des Aufwands zur Probengenerierung wurden für diese Versuche die Durchläufer aus den Dauerfestigkeitsversuchen genutzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Proben im Ausgangszustand mindestens so hohe Festigkeitswerte aufweisen wie die Durchläufer mit Einwirkungen aus der dynamischen Prüfung. Die Ergebnisse für die Kennwerte der statischen Festigkeit sind in Abbildung 65 zusammengefasst. Die Messung wurde bei Raumtemperatur und gemäß DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt. Dabei sind die jeweils höchsten Anforderungen für den entsprechenden gegossenen Werkstoff eingezeichnet. Diese beziehen sich auf den gegossenen und wärmebehandelten Zustand.



**Legende:** - - - Mindestanforderungen aus DIN EN 1706 für Gusswerkstoff AlSi10Mg

Abbildung 65: Kennwerte aus dem Zugversuch für Neupulver (0 %), 10 % und 20 % ESUK-Anteil im Abgleich zu Anforderungen an den gegossenen Werkstoff, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung der Messungen ( $n = 3$  Proben)

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse für alle drei Zustände die Anforderungen erfüllen. Die Zustände verhalten sich dabei leicht unterschiedlich. Die stärkste Abweichung zeigt sich bei den Dehngrenzen, die bei den beiden Zuständen mit ESUK-Einbringungen geringer ausfallen als beim Ausgangszustand.

Im Hinblick auf die Bewertung der Pulverrecyclingstrategie in diesem Anwendungsfall kann festgestellt werden, dass sich nur geringfügige Einschränkungen hinsichtlich der betrachteten Bauteileigenschaften zeigen. Die geforderte Bauteilqualität wird auch von den Proben aus dem Pulver des maximalen Alterungszustands (20 % ESUK-Anteil) voll erfüllt. Diese Pulverrecyclingstrategie kann in diesem Fall also für alle weiteren Produktionsprogramme mit gleichen oder niedrigeren Bauteilanforderungen freigegeben werden.

### **6.5.2 Anwendungsbeispiel Nutzungsstufe 2**

Auch wenn sich im Unterabschnitt 6.5.1 gezeigt hat, dass das größtmögliche Pulverrecycling die Erfüllung der Bauteilanforderungen nicht beeinträchtigt, wird in diesem Unterabschnitt die Stufe 2 der Nutzung der Methode angewendet. Dieser Schritt kann auch dann erforderlich werden, wenn durch den maximalen ESUK-Gehalt vorgegebene Grenzwerte für Elementgehalte überschritten werden. Beim Werkstoff Ti6Al4V können beispielsweise Grenzwerte für einen maximalen Sauerstoffgehalt bestehen (ASTM F3001-14). Im Sinne der Nutzungsstufe 2 werden im Folgenden Maßnahmen zur Optimierung der Recyclingstrategie hinsichtlich ihres Aufwands und Nutzens bewertet.

#### **Anpassung der Recyclingstrategie**

Der Grad des Pulverrecyclings kann über die im vierten Schritt der Methode (vgl. Unterabschnitt 6.4.3.4) beschriebenen Maßnahmen reduziert werden. Zur Bewertung der Wirksamkeit der Maßnahmen und des Aufwands werden auf Basis der Modellierung die Änderung des maximalen ESUK-Anteils und die zusätzlichen Pulververluste bestimmt, die durch die Maßnahme in Bezug auf den betrachteten Anwendungsfall entstehen. Die Maßnahmen werden zur möglichst direkten Vergleichbarkeit so angewendet, dass, sofern möglich, eine Halbierung des ESUK-Anteils erreicht wird.

#### Maßnahme 1: Entsorgung des Bauraumpulvers

Bei dem betrachteten Produktionsprogramm liegen 33,9 % des ESUK im Bauraumpulver vor. Der maximale ESUK-Anteil kann um diesen Betrag reduziert



---

werden, wenn das Bauraumpulver nicht wiederverwendet wird. Das Bauraumpulver macht gleichzeitig 27,6 % der gesamten entstehenden Spritzermasse aus. Bei einer Gesamtspritzermasse über die 10 Zyklen von 608,5 g bedeutet dies Pulververluste von 167,7 g, wenn das Bauraumpulver nicht wiederverwendet wird. Bezogen auf die eingesetzte Pulvermenge von 3,895 kg entspricht dies 4,31 % der Ausgangsmasse.

#### Maßnahme 2: Feinere Siebmaschenweite

Durch die Verwendung einer feineren Siebstufe kann ein größerer Anteil der Prozessspritzer aus dem Recyclingpulver entfernt werden. Eine feinere und standardisierte Siebstufe im Anwendungsfall liegt bei 63 µm. Der spaltenweise gemittelte Unterkornanteil liegt bei einer Trennung des Pulvers bei 63 µm zwischen 24,4 % und 63,5 % und damit deutlich unter den Werten bei einer Maschenweite von 75 µm (vgl. Abbildung 53). Im Hinblick auf den Anteil des ESUK zeigt sich durch den Schritt im betrachteten Anwendungsfall, dass 10 % mehr Prozessspritzer aus dem Pulver entfernt werden können. Die Verluste entstehen als Überkorn beim Sieben. Nach den betrachteten 10 Zyklen entspricht dies zusätzlichen Verlusten von 20,3 g und somit bezogen auf die Ausgangsmenge 0,52 %. Die Maßnahme ermöglicht ähnlich wie Maßnahme 1 das Entfernen von Spritzern in einer hohen Konzentration. Dadurch besteht ein günstiges Verhältnis zwischen Einsparungen und Verlusten. Allerdings beinhaltet die Maßnahme den Nachteil, dass sich durch die Nutzung eines feineren Siebs die Siebdauer erhöhen und ein häufigeres Reinigen des Siebs erforderlich wird.

#### Maßnahme 3: Zyklenlimitierung

Da die Begrenzung der Nutzungszyklen nur in diskreten Stufen realisiert werden kann, ist eine genaue Halbierung des ESUK-Anteils nicht möglich. Es werden daher die beiden angrenzenden Fälle in Form der Limitierung nach dem 4. und 5. Zyklus betrachtet. Der ESUK-Anteil liegt nach dem 4. Zyklus bei 41,7 % des Maximalwertes und nach dem 5. Zyklus entsprechend bei 51,8 %. Durch die beiden Maßnahmen würden jeweils 62,1 % (4. Zyklus, Maßnahme 3.1) bzw. 53,5 % (5. Zyklus, Maßnahme 3.2) der Ausgangspulvermasse nicht mehr weiter verwendet und somit als Verlust anfallen. Es gilt zu berücksichtigen, dass das Pulver nach der Beschränkung theoretisch für andere Zwecke verwendet werden kann, beispielsweise für Bauteile mit geringen Qualitätsanforderungen oder Prototypen.

### Maßnahme 4: Optimierte Positionierung im Bauraum

Wird das betrachtete Bauteil ganz links auf der Baufläche bzw. direkt am SGS-Auslass angeordnet und wird das Bauraumpulver wiederverwendet (Maßnahme 4.1), fällt der maximale ESUK-Anteil um 34,2 % ab. Es fallen dabei zusätzliche Verluste von 69,3 g bzw. 1,78 % der Ausgangsmenge an. Wird die Positionierung des Bauteils analog geändert und das Bauraumpulver nicht wiederverwendet (Maßnahme 4.2), so fällt der ESUK-Anteil um 89,1 % ab. Gleichzeitig steigen die Pulververluste an, weil mehr Bauraumpulver abgesaugt wird. Dies betrifft 65,1 % der entstehenden Spritzer. Im Vergleich zum Ausgangszustand bedeutet dies einen zusätzlichen Pulververlust von 190,4 g bzw. 4,89 % der Ausgangsmenge der Pulvercharge. Der Nachteil beider Maßnahmen besteht darin, dass deutlich mehr Pulver in den SGS-Auslass und damit in das Filtersystem der Anlage gelangt. Es landen bei der geänderten Bauteilanordnung 23,4 % der entstehenden Spritzer im SGS-Auslass und somit im Filter. Dies resultiert in häufigeren Filterwechseln.

### Maßnahme 5: Auffrischen mit Neupulver

Durch die Umstellung des Mischkonzeptes von der kollektiven Alterung auf das kontinuierliche Auffrischen kann die Alterung des Pulvers beliebig verlangsamt werden. Um den ESUK-Gehalt zu halbieren, wäre eine Auffrischpulvermenge von 954,7 g erforderlich. Die Reduzierung des ESUK-Anteils durch diese Maßnahme weist einen asymptotischen Grenzwert bei 100 % auf, der nicht erreicht werden kann. Die Maßnahme bedingt, abgesehen von Schüttverlusten beim Mischen der Pulver, nahezu keine Verluste. Um langfristig Recyclingpulver auffrischen zu können, müssen verschiedene Pulverchargen vereint werden. Dies erschwert die Rückverfolgbarkeit von Pulverchargen, die in manchen Branchen eine Anforderung an die Zulassung darstellt. Außerdem wird die Prozesskette des Pulvers um einen zusätzlichen Schritt erweitert. Weiterhin erhöht sich mit dem Auffrischen auch die Reichweite der Pulvercharge, so dass bei einem ähnlichen weiteren Produktionsprogramm wiederum mit einem Anstieg des ESUK-Anteils auf ein ähnliches Niveau zu rechnen ist.

### **Vergleich der Optimierungsmaßnahmen**

Die Reduzierung des ESUK-Anteils durch die einzelnen Maßnahmen sowie die damit verbundenen Pulververluste können mittels des Modells berechnet werden. Die Ergebnisse für diesen Anwendungsfall sind in Abbildung 66 zusammengefasst. Dabei gilt es zu beachten, dass die Ordinate logarithmisch aufgetragen ist.

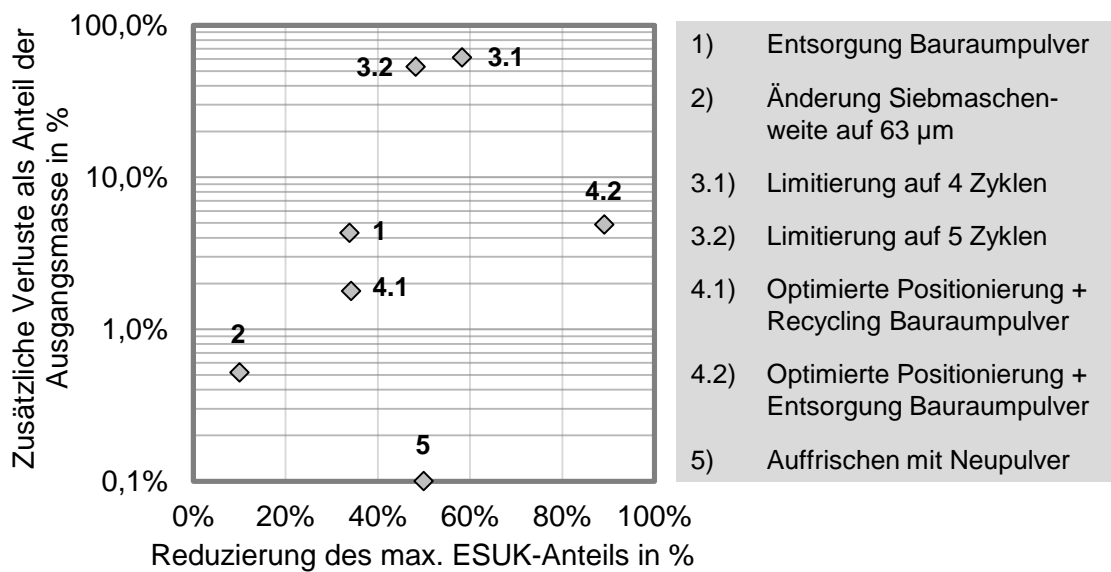


Abbildung 66: Effekt der Maßnahmen zur Reduzierung des ESUK-Anteils und damit verbundene zusätzliche Pulververluste

Die vorgeschlagenen Maßnahmen unterscheiden sich wesentlich in beiden Betrachtungsdimensionen. Natürlich bieten sich gerade beim betrachteten Extremfall des Pulverrecyclinggrades viele Verbesserungspotenziale. Im Vergleich zwischen den Maßnahmen weist die Anpassung der Bauteilpositionierung gerade in Kombination mit der Entsorgung des Bauteilpulvers eine besonders hohe Effektivität auf (89,1 % Reduzierung bei 4,9 % Verlustzunahme). Hohe zusätzliche Verlustwerte von 53,3 % und 61,2 % zeigen sich bei den beiden Varianten der Beschränkung der Verwendung durch Zyklenlimits. Die Reduzierung der Siebmaschenweite zeichnet sich durch eine besonders hohe Effizienz mit einer Verlustzunahme von nur 0,52 % aus, ist aber in ihrer Wirkung beschränkt auf eine ESUK-Reduzierung um 10 %. Mit einer Verlangsamung der Alterung um 33,9 % bei einer Verlustzunahme von 4,3 % stellt die Entsorgung des Bauraumpulvers eine geeignete Maßnahme dar, die bei anderen Bauteilgeometrien noch stärker ausfallen kann.

Insgesamt zeigt der modellbasierte Vergleich, dass die Maßnahmen sich in ihrer Wirkung und dem Einfluss auf die Materialeffizienz wesentlich unterscheiden. Die Ergebnisse helfen dabei die Eignung der Maßnahmen abzuschätzen. Die quantifizierten Änderungsoptionen der Pulverrecyclingstrategie können genutzt werden, um für beliebige Produktionsprogramme den maximal auftretenden ESUK-Anteil gezielt unter einem Grenzwert zu halten. Diese situationspezifische Steuerung kann als adaptive Pulverrecyclingstrategie verstanden werden.

### 6.5.3 Diskussion

In diesem Unterabschnitt werden die Ergebnisse der Anwendung der Methode diskutiert. Dabei wird zwischen dem Werkstoffverhalten und den Implikationen der Ergebnisse für das Pulverrecycling unterschieden.

#### 6.5.3.1 Werkstoffverhalten

Anhand der Ergebnisse kann der Einfluss des Sauerstoffgehalts auf die Werkstoffeigenschaften bei AlSi10Mg analysiert werden. In den verwendeten Pulvern zeigt sich ein Anstieg des Sauerstoffgehalts um 18,3 % und 37,7 % bei den Zuständen mit 10 % und 20 % ESUK-Anteil (vgl. Abbildung 67). Damit zeigt sich, dass auch in diesem Fall der Sauerstoffgehalt direkt proportional zur Spritzereinbringung ansteigt.

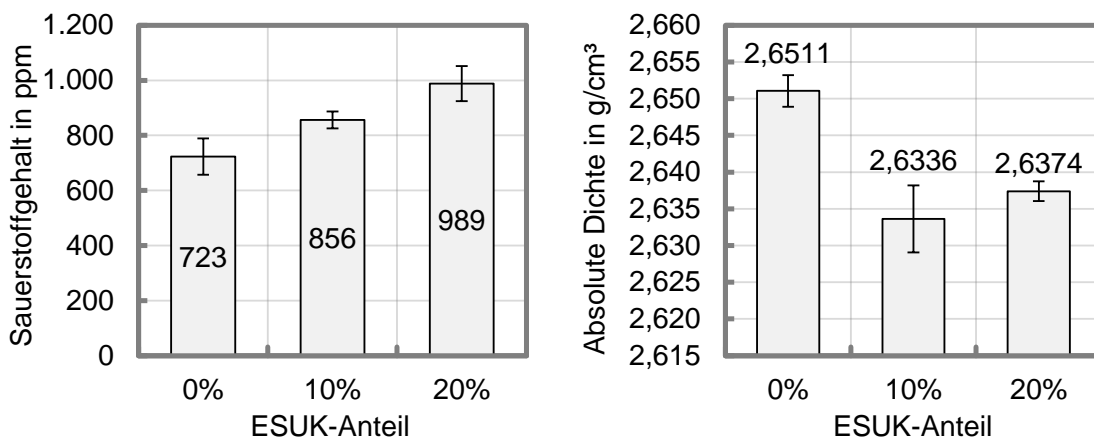


Abbildung 67: Sauerstoffgehalt der betrachteten Pulverzustände, gemessen mittels Heißgasextraktion, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung ( $n = 5$  Messungen) und Bauteildichte, gemessen mittels Archimedisches Prinzip, Fehlerindikator:  $\pm 1$ -Sigma-Standardabweichung ( $n = 5$  Würfel)

Bei der resultierenden Bauteildichte zeigt sich eine Verringerung durch die Einbringung des Spritzerunterkorns. Im Hinblick auf die statischen Festigkeitswerte fällt auf, dass bei diesen Zuständen analog eine reduzierte Dehngrenze gemessen wurde. Dies deutet auf eine Korrelation zwischen der Bauteildichte und der Dehngrenze hin. Der Unterschied in der Dichte wirkt sich dabei allerdings nicht oder nur geringfügig auf die dynamische Festigkeit aus. Dies deutet darauf hin, dass die Dichte bei AlSi10Mg nur indirekt mit der Dauerfestigkeit zusammenhängt.

Laut der werkstofftechnischen Grundlagen ist eine Auswirkung des erhöhten Sauerstoffgehalts auf die dynamische Festigkeit bei Aluminiumlegierungen zu erwarten. Abbildung 68 zeigt für die im Rahmen der Dauerfestigkeitsuntersuchungen betrachteten Oberspannungen die relative Abweichung zwischen den Proben mit 0 % und 20 % ESUK-Anteil mit der jeweils geringsten Lastspielzahl. Dabei werden somit nur die am frühesten gebrochenen Proben für jede Laststufe betrachtet.

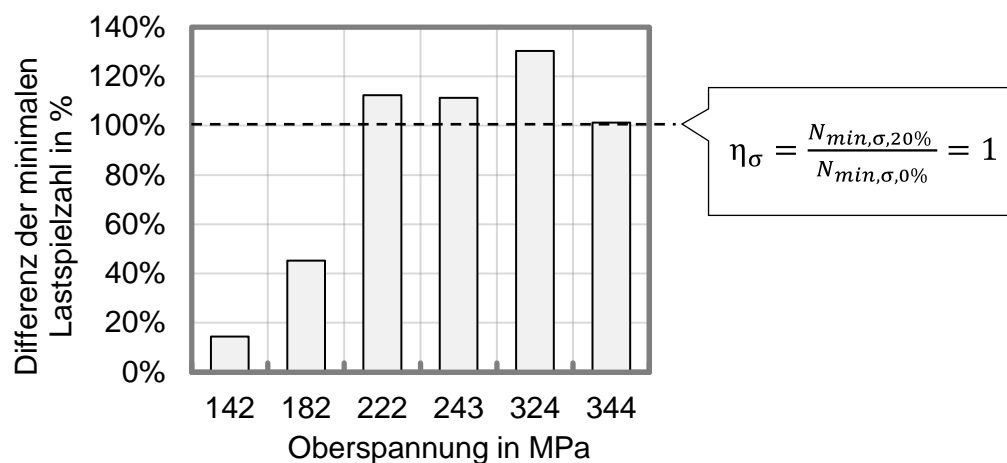


Abbildung 68: Verhältnis der minimalen erreichten Lastspielzahlen des 20%-Zustands und des 0%-Zustands

Betrachtet man die relative Abweichung der minimalen erreichten Lastzyklen des 20%-Zustands im Vergleich zum Ausgangszustand, so zeigt sich, dass die Werte im Bereich der Oberspannungen unter ca. 200 MPa deutlich unter 100 % liegen. Das bedeutet, dass bei diesen Spannungen einzelne Proben des 20%-Zustands deutlich weniger Lastspiele aushalten als der Ausgangszustand. Im Bereich der hohen Oberspannungen und der geringen Lastspielzahlen zeigt sich eine geringe Erhöhung der Schwingungsfestigkeit des Zustands mit höherem Sauerstoffgehalt. Dieses Verhalten stützt die These, dass der erhöhte Sauerstoffgehalt zu einer Versprödung und zu Defekten führt, die das Werkstoffverhalten im Bereich geringer Oberspannungen bzw. sehr hoher Lastspielzahlen verändern.

Die Ergebnisse aus dem ersten Anwendungsbeispiel sind spezifisch für die betrachtete Referenzanwendung zu verstehen. Bei einem Wechsel der Anlage, des Werkstoffs oder der Prozessparameter kann sich ein anderes Verhalten einstellen. Für die Einordnung des Anwendungsbeispiels gilt es zu beachten, dass die bei den verwendeten Prozessparametern eingebrachte Energie im Vergleich zu anderen

Quellen vergleichsweise hoch gewählt wurde. Es besteht die These, dass bei einer hohen Energiedichte Prozessspritzer besonders gut aufgeschmolzen werden können (TAHERI ANDANI ET AL. 2018). Dies würde gerade für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf geringere Energiedichten eine kritische Überprüfung erfordern.

### **6.5.3.2 Implikationen für die Anwendung des Pulverrecyclings**

Die Zyklenbeschränkung stellt in der industriellen Praxis ein gängiges Mittel für das Pulvermanagement dar. Gerade diese Maßnahme zeichnet sich jedoch durch ein schlechtes Verhältnis von Effektivität zu Effizienz aus. Damit ist es im Vergleich zu den weiteren beschriebenen Maßnahmen besonders ungeeignet. Entscheidend für die Einordnung dieser Maßnahme ist, was mit dem Pulver nach dem letzten Zyklus passiert. Eine geeigneter Ansatz kann darin liegen, dass mehrere Pulverchargen über dem Zyklenlimit vereint, homogenisiert und danach neu charakterisiert und zertifiziert werden. Diese Mischung kann als neue Pulvercharge behandelt werden, sofern die geforderten Eigenschaften noch erfüllt werden.

Als effektive und effiziente Maßnahmen zur Verlangsamung der Alterung bieten sich die Entsorgung des Bauraumpulvers, die Anpassung der Bauteilanordnung und eine Reduzierung der Siebmaschenweite an, um die Pulveralterung zu verlangsamen ohne dabei hohe Verluste zu erzeugen.

Die Anzahl der Verarbeitungszyklen eignet sich nur bedingt zur Beschreibung des Alterungszustands. Bei dieser Kennzahl werden die Charakteristika der gefertigten Baujobs (z. B. Bauteilgeometrie und -anzahl) nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse in dieser Arbeit zeigen, dass andere Kennzahlen den Alterungszustand präziser beschreiben können. Hierzu bietet sich der Anstieg des Gehalts nichtmetallischer Legierungselemente oder der ESUK-Anteil an. Diese Werte können auch über das Massenverhältnis beim Mischen von mehreren Chargen weitergegeben werden, was ein Problem bei der Zyklenzahl darstellt.

Um dem Überschreiten eines Sauerstoffgrenzwertes im Sinne der Qualitätssicherung entgegenzuwirken, kann bei der Beschaffung von Pulvermaterialien gezielt eine Spezifikation mit besonders niedrigem Sauerstoffgehalt vorgesehen werden. Damit haben die Pulvermaterialien ein hohes Alterungsvermögen. Vor diesem Hintergrund könnte zwischen einer Beschaffungsspezifikation und einer maximal zulässigen Verarbeitungsspezifikation unterschieden werden. Gerade beim Sauerstoffgehalt

gilt es gleichzeitig auch einen unteren Grenzwert vorzusehen, der eine Passivierung des Pulvers gewährleistet.

Basierend auf den Ergebnissen der Anwendung der Methode kann die Richtlinie für die Bauteilanordnung abgeleitet werden, dass massive Teile an den SGS-Auslass und filigrane Komponenten auf der gegenüberliegenden Seite der Baufläche angeordnet werden sollten. Damit kann die Pulveralterung verlangsamt werden, weiterhin gelangen auch weniger Prozessspritzer in die gefertigten Bauteile.

## 6.6 Evaluierung der Methode

In diesem Abschnitt wird die Methode hinsichtlich der gestellten Anforderungen evaluiert. Weiterhin werden der Mehrwert und die Einordnung der Methode in den Kontext der Qualitätssicherung diskutiert. Abschließend wird die Wirtschaftlichkeit anhand einer Aufwand-Nutzen-Betrachtung bewertet.

### 6.6.1 Erfüllung der Anforderungen

Basierend auf der Anwendung der Methode kann für die einzelnen funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen der Grad der Erfüllung bewertet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Erfüllungsgrad der Anforderungen an die Methode

	Anforderungen	Erfüllungsgrad
<b>Funktional</b>	Bewertung von Pulverrecyclingstrategien	●
	Anpassbarkeit auf Qualitätsniveaus	◐
	Einbeziehung Produktionsprogramm	●
	Abbildung des Effektes Spritzereinbringung	●
	Bereitstellung von Optimierungsmaßnahmen	◐
<b>Nicht-funktional</b>	Flexibilität hinsichtlich des Ausgangswissens des Anwenders	●
	Modularisierbarkeit	◐
	Praxistauglichkeit	◐
○ Anforderungen nicht erfüllt; ◐ Ansätze vorhanden; ◑ Wichtige Aspekte umgesetzt; ◒ Anforderungen überwiegend erfüllt; ● Anforderungen vollständig erfüllt		

**Bewertung von Pulverrecyclingstrategien:** Die Methode ermöglicht es, Pulverrecyclingstrategien anhand ihres Einflusses auf den Pulverzustand und die damit verbundene Wirkung auf die Bauteilqualität zu bewerten. Die Gestaltungsoptionen aus dem morphologischen Kasten der Pulverrecyclingstrategie werden in der Modellierung abgebildet. Für diese Varianten kann der maximale Alterungszustand ermittelt werden, anhand dessen die Pulverrecyclingstrategie für den betrachteten Anwendungsfall bewertet wird. In der Nutzungsstufe 2 kann die Pulverrecyclingstrategie kontinuierlich auf geplante Produktionsprogramme angepasst werden. Besteht im Schritt 2 der Methode keine Bewertungsgrundlage (z. B. Materialstandards, normative Vorgaben), so kann diese im Rahmen der experimentellen Absicherung geschaffen werden.

**Anpassbarkeit auf Qualitätsniveaus:** Die Anpassung auf unterschiedliche Zielqualitätsniveaus wird durch die spezifischen Bauteilanforderungen in der Methode berücksichtigt. Diese können je nach Anwendung und Branche frei gewählt werden und werden direkt in der Bewertung des Einflusses des Recycling auf die Bauteileigenschaften einbezogen. Weiterhin können beliebige Qualitätsstandards bei der Bewertung der Pulverrecyclingstrategie (Schritt 2) eingebunden werden, beispielsweise für den maximal zusätzlichen Sauerstoffgehalt in Titanlegierungen. Allerdings ist die Einbeziehung sämtlicher relevanter Bauteilanforderungen im Hinblick auf den Aufwand zur Durchführung der Methode nicht praktikabel, so dass es die kritischen Anforderungen des betrachteten Spektrums auszuwählen gilt. Diese wirken dann stellvertretend für die Gesamtheit der Bauteile und Anforderungen.

**Einbeziehung Produktionsprogramm:** Das geplante Produktionsprogramm wird im Rahmen der Modellierung vollständig abgebildet. Dabei bildet die Position der Bauteile im Bauraum, deren Geometrie sowie die Bauhöhe Parameter für die Berechnung. Diese Funktionalität ist gerade in der Nutzungsstufe 2 von Bedeutung, in der kontinuierlich die Eignung der genutzten Pulverrecyclingstrategie für geplante Produktionsprogramme bewertet wird.

**Abbildung des Effektes Spritzereinbringung:** Dieser Effekt wird durch die Verwendung der Modellierung aus Kapitel 5 einbezogen. Er stellt in der Methode den zentralen und alleinigen Alterungseffekt durch die Wiederverwendung dar. Andere qualitätsrelevante Änderungseffekte werden durch die Anwendung technischer Maßnahmen (vgl. Unterabschnitt 4.3.1) ausgeschlossen.



---

**Bereitstellung von Optimierungsmaßnahmen:** Zeigt sich bei der Anwendung der Methode, dass bei der Nutzung einer Pulverrecyclingstrategie Qualitätsanforderungen verletzt werden, so bietet die Methode konkrete Optimierungsmaßnahmen für die Einschränkung des Recycling. Diese ergeben sich aus dem morphologischen Kasten der Gestaltungsoptionen. Die Wirkung der Maßnahmen auf das Alterungsverhalten und die dadurch bedingten zusätzlichen Pulververluste werden dabei anhand des Modells quantifiziert. Somit kann eine systematische Anpassung der Pulverrecyclingstrategie erfolgen, bis vorgegebene Qualitätsanforderungen erreicht werden. Durch das Modell kann theoretisch eine ESUK-optimale Bauteilanordnung berechnet werden, bei der am wenigsten Spritzerunterkorn eingebracht wird. In der vorgestellten Methode ist dies nicht beinhaltet.

**Flexibilität hinsichtlich des Ausgangswissens des Anwenders:** Die Methode kann je nach Ausgangswissen des Anwenders in zwei Stufen genutzt werden. Die erste Stufe kann ohne Vorwissen über Pulverrecycling gestartet werden. Besteht schon Vorwissen in Form von Grenzwerten für den Pulverzustand, so kann dies im Rahmen der Bewertung (Schritt 2) eingebunden werden.

**Modularisierbarkeit:** Der Umfang der Methode kann durch den Anwender beeinflusst werden. Dies betrifft vor allem die experimentelle Absicherung, die den größten Aufwand in der Anwendung der Methode ausmacht. Hierbei kann der Umfang der zu betrachteten Bauteilanforderungen sowie die Probenanzahl frei gewählt werden. Die Unterscheidung von zwei Nutzungsstufen trägt weiterhin zur Modularität bei. Diese können bei Bedarf einzeln und unabhängig voneinander durchlaufen werden.

**Praxistauglichkeit:** Die praktische Umsetzbarkeit der Methode wurde anhand von zwei industrienahen Anwendungsbeispielen validiert. Die Praxistauglichkeit des Vorgehens innerhalb der Methode wurde durch Diskussionen mit Industrieexperten plausibilisiert. Die Anwendbarkeit wurde dabei positiv beurteilt. Durch zusätzliche Anwendungsbeispiele im industriellen Kontext könnte die Praxistauglichkeit noch weiter validiert werden.

## 6.6.2 Reflexion und kritische Betrachtung

Im Kontext der Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen kann die Methode einen Baustein eines ganzheitlichen **Qualitätsmanagements** bilden. Sie ist damit nicht als alleinige Maßnahme der Qualitätssicherung zu verstehen, da beim LBM

weitere Einflussgrößen, wie der Anlagenzustand oder die Datenvorbereitung, die Qualität des Prozessergebnisses beeinflussen. Die Methode ersetzt nicht gänzlich die regelmäßige Überprüfung des Pulverzustands. Viele Einflussfaktoren auf den Pulverzustand werden durch die Methode nicht kontrolliert (z. B. Kontamination, adsorbierte Feuchte). Eine stichprobenartige Analyse hinsichtlich der relevanten Pulvereigenschaften (vgl. Abschnitt 2.3) stellt daher eine sinnvolle Ergänzung zu dem entwickelten Ansatz dar.

Bei der **Zulassung** des Laserstrahlschmelzens für hinsichtlich der Bauteilqualität anspruchsvolle Anwendungsbereiche kann die Methode einen Baustein darstellen, mit dem eine definierte Pulverrecyclingstrategie bewertet und im Sinne der Zulassung freigegeben werden kann. Zeigt sich im Rahmen der Methode eine negative Wirkung der Alterung auf die Bauteileigenschaften, so kann dieser Unterschied im Materialverhalten bei der Auslegung berücksichtigt wird. Das Materialmodell für den Festigkeitsnachweis wäre dazu um einen oder mehrere Alterungszustände des Pulvers zu erweitern. Dafür wäre eine präzise Kennzahl zur Quantifizierung des Alterungszustands erforderlich, wie beispielsweise der in dieser Arbeit beschriebene ESUK-Anteil.

Die **Bedeutung** der Methode nimmt bei größeren Bauräumen zu. Je größer die Baufläche, desto mehr Spritzer gelangen in das Pulverbett und desto schneller altert das Pulver. Weiterhin kann die Methode einen Mehrwert bieten, wenn im Rahmen des Recyclings besonders viele Pulverzustände erzeugt werden wie beispielsweise bei der Anwendung des kontinuierlichen Auffrischens als Mischkonzept. In diesem Fall kann der Prüfaufwand zur kontinuierlichen Charakterisierung der Pulverzustände extreme Ausmaße annehmen. Durch Nutzung des Modells kann der Alterungszustand chargenweise und mit geringem Aufwand parallel modelliert und prognostiziert werden.

Während die Methode eine Option für die Qualitätssicherung beim Pulverrecycling darstellt, können vor diesem Hintergrund auch **alternative Ansätze** genutzt werden. Als eine Alternative kann die Pulverqualität bei der Wiederverwendung des Pulvers auch durch statistische Prozesslenkung (SPC) auf Basis einer Pulverspezifikation kontrolliert werden. Dazu ist das Pulver nach jedem Zyklus hinsichtlich der relevanten Pulvereigenschaften zu prüfen (vgl. VDI-RICHTLINIE 3405 BLATT 2.3). Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit würde dies die Partikelgrößenverteilung sowie die Konzentration nichtmetallischer Oberflächenelemente betreffen. Je nach Anzahl der chemischen Elemente entspricht dies einem Analyseaufwand von ca. 125 € bis 380 € pro Zyklus. Die Messwerte

---

könnten auf einer Qualitätsregelkarte gesammelt werden. Obere und untere Warn- und Eingriffsgrenzen sind allerdings nicht bekannt und wären für diesen Zweck anwendungsspezifisch zu ermitteln. Die Übertragbarkeit zwischen Anlagen, Werkstoffen und Prozessparametern ist hierbei vorerst unklar. Vor allem bei langen Pulverlebenszyklen kann dieses Vorgehen einen hohen Messaufwand bedeuten. Einen Stellhebel für die Wirtschaftlichkeit bietet die gezielte Einstellung der Häufigkeit der Pulverzustandskontrolle.

Durch die Methode hat sich gezeigt, dass das Vorgehen beim Pulverrecycling auf der Ebene der **Produktionssteuerung** optimiert werden kann. So können Pulverchargen, die aufgrund ihre initialen Pulvereigenschaften ein hohes Alterungsvermögen aufweisen (z. B. geringer Sauerstoffgehalt im Ausgangszustand), den Baujobs zugeteilt werden, die eine starke Alterung hervorrufen. Über diese Disposition von Pulverchargen zu Baujobs könnten Pulverchargen im Durchschnitt länger verwendet werden. Für die Umsetzung wäre ein Pulvermanagement erforderlich, bei dem Pulverchargen gezielt bestimmten Baujobs zugewiesen werden können.

Eine zentrale Annahme in der Methode besteht in der **alleinigen Änderung des Pulverzustands** durch die Einbringung von Prozessspritzern. Diese fußt auf der Charakterisierung der Änderungseffekte für die drei Referenzwerkstoffe in Kapitel 4. Die Annahme kann nur gültig sein, wenn die Richtlinien zur Handhabung und Lagerung eingehalten werden und so Effekte im Zusammenhang mit Umgebungsfeuchte ausgeschlossen werden. Eine Aussage über die Gültigkeit der Erkenntnis für weitere Werkstoffe wäre durch weitere experimentelle Untersuchungen zu überprüfen.

Die **Übertragbarkeit** der Ergebnisse der Methode zwischen Anwendungsfällen stellt eine offene Fragestellung dar. Diese kann beantwortet werden, in dem die Methode auf mehr Anlagen, Werkstoff oder Parametersätze angewendet wird. Gerade durch die ausschließliche Variation einzelner Einflussgrößen kann ein Verständnis der Übertragbarkeit generiert werden. Langfristig könnte eine Datenbank mit ESUK-Profilen für verschiedene Materialien, Anlagen und Prozessparameter den Aufwand zur Durchführung der Methode weiter reduzieren.

### **6.6.3 Aufwand-Nutzen-Betrachtung**

Die Wirtschaftlichkeit der Anwendung der Methode kann über eine Kosten-Nutzen-Rechnung bestimmt werden. Kosten ergeben sich dabei aus dem Aufwand zur

Durchführung der Methode. Der Nutzen kann in einer Verringerung der Materialverluste oder einer verbesserten Bauteilqualität liegen. Abbildung 69 zeigt die beiden Nutzendimensionen, die sich ergeben können, wenn durch Anwendung der Methode die maximal nutzbare Zyklenzahl des Pulvermaterials bei der Produktion mittels Laserstrahlschmelzen verändert wird. Die Limitierung der Nutzungszyklen stellt aktuell die am weitesten verbreitete Maßnahme zur Einschränkung des Pulverrecyclings dar.

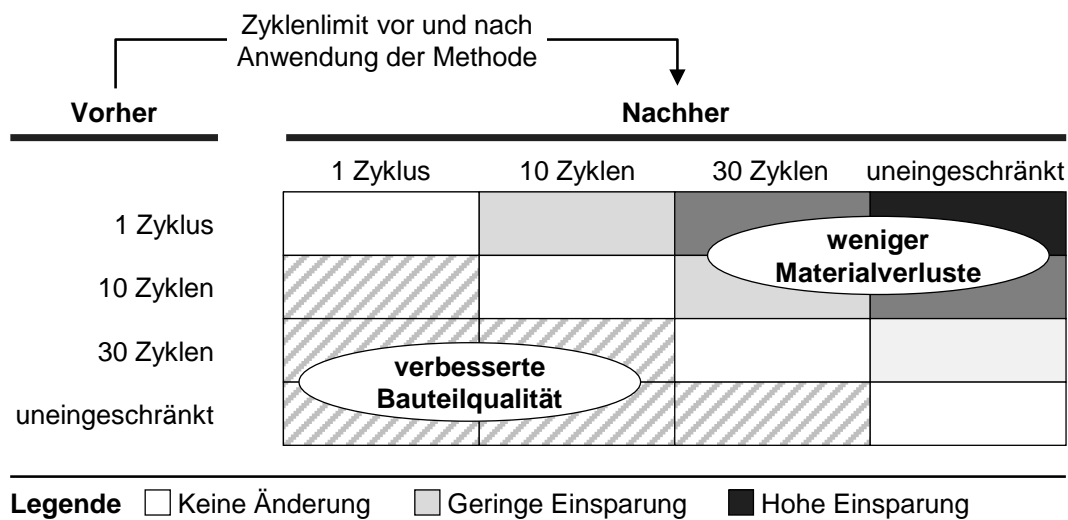


Abbildung 69: Nutzendimensionen durch die Änderung des verwendeten Zykluslimits nach Anwendung der Methode

Einerseits können durch eine Erhöhung des Recyclinggrads Verluste vermieden werden, die sich aus der Entsorgung des Pulvers nach der maximalen Zyklenzahl ergeben. Andererseits kann eine Begrenzung des Recyclings zu einer Verbesserung der Bauteilqualität führen, die sich unter anderem durch geringere Ausschussraten bemerkbar macht und darüber eine Kostenersparnis verursacht.

### 6.6.3.1 Aufwand zur Durchführung der Methode

Der Aufwand für die Anwendung der Methode kann in zwei Schritte aufgeteilt werden: Die Kalibrierung des Modells sowie die Bewertung und experimentelle Absicherung. Die Kalkulation der Aufwände basiert auf den Anwendungsbeispielen aus Abschnitt 6.5. Die Berechnung wird anschließend von AlSi10Mg auf die beiden Werkstoffe Ti6Al4V und Edelstahl 1.4404 übertragen. Die Aufwände für die Kalibrierung sind in Tabelle 11 aufgelistet. Dabei wird von einem Personalkostensatz von 480 € pro Personentag (PT) ausgegangen.

Tabelle 11: Kosten für die Kalibrierung des Modells im Anwendungsbeispiel

Schritt und Bezeichnung	Einheit	Wert	Kosten
<b>Kalibrierungsbaujob für Modellierung</b>			<b>1.820 €</b>
Materialkosten			428 €
Materialpreis Pulverwerkstoff AlSi10Mg	€/kg	68	
Benötigte Materialmenge pro Job	kg	6,3	
Anlagenkosten			202 €
Maschinenstundensatz LBM-Anlage SLM125HL	€/h	20,2	
Dauer der Maschinenbelegung	h	10	
Personalkosten			840 €
Planung und Vorbereitung des Versuchs	PT	1	
Kalibrierungsjob und begleitende Messungen	PT	0,75	
Herstellungskosten Vorrichtung (Stereolithographie)			350 €
<b>Pulveranalysen für die Kalibrierung des Modells</b>			<b>960 €</b>
Probenanzahl Partikelgrößenverteilung	Stück	13	
Probenanzahl Sauerstoffgehalt	Stück	6	
Analysekosten Partikelgrößenverteilung	€/Stück	30	
Analysekosten Sauerstoffgehalt	€/Stück	95	
<b>Dateneingabe in das Modell</b>	PT	0,5	<b>240 €</b>
<b>Summe</b>			<b>3.020 €</b>

Die Kosten für die Kalibrierung umfassen die Durchführung des Kalibrierungsbaujobs, die Analyse der Pulverproben sowie die Dateneingabe in das Modell und belaufen sich kumuliert auf 3.020 €. Die Kosten für die Bewertung und die experimentelle Absicherung sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Kosten für die Bewertung und experimentelle Absicherung im Anwendungsbeispiel

Schritt und Bezeichnung	Einheit	Wert	Kosten
<b>Workshop: Bewertung und Optimierung der PRS</b>			<b>360 €</b>
Workshop mit 3 Mitarbeitern, Dauer 2 Stunden	PT	0,75	
<b>Bedarf für SUK-Generierungs-Baujobs</b>			
Benötigte Pulvermenge für Probenherstellung	kg	2,94	
Bedarf an SUK-Masse (Ziel: 20 % ESUK-Anteil)	g	588	
Maximal gewinnbare SUK-Masse pro Baujob	g	95	
Bedarf an Baujobs zur SUK-Generierung	Baujobs	6,2	
<b>Baujobs zur SUK-Generierung</b>			<b>5.630 €</b>
Materialkosten pro Job			571 €
Materialpreis Pulverwerkstoff AlSi10Mg	€/kg	68	
Benötigte Materialmenge pro Job	kg	8,4	
Anlagenkosten pro Job			242 €
Maschinenstundensatz LBM-Anlage SLM125HL	€/h	20,2	

Schritt und Bezeichnung	Einheit	Wert	Kosten
Dauer der Maschinenbelegung	h	12	
Personalkosten pro Job			96 €
Durchführung Baujob (Rüsten und Auspacken)	PT	0,2	
<b>Baujobs zur Herstellung der Probekörper</b>			<b>761 €</b>
Materialkosten			160 €
Materialpreis Pulverwerkstoff AlSi10Mg	€/kg	68	
Benötigte Materialmenge pro Job	kg	2,35	
Anlagenkosten			121 €
Maschinenstundensatz LBM-Anlage SLM125HL	€/h	20,2	
Dauer der Maschinenbelegung	h	6	
Personalkosten			480 €
Durchführung der Baujobs (Rüsten und Auspacken)	PT	1	
<b>Prüfung der Proben</b>			<b>5.250 €</b>
Probenanzahl statischer Zugversuch	Stück	5	
Probenanzahl Dauerschwingfestigkeit	Stück	10	
Prüfkosten statischer Zugversuch	€/Stück	250	
Prüfkosten Dauerschwingversuch	€/Stück	400	
<b>Summe</b>			<b>12.001 €</b>

Die Kosten für diesen Abschnitt setzen sich zusammen aus einem Workshop und den Tätigkeiten im Rahmen der experimentellen Absicherung. Sie belaufen sich auf 12.001 € In Summe betragen die Aufwände für die Durchführung am Beispiel von AlSi10Mg 15.021 € Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden weiterhin die Werkstoffe Ti6Al4V und der Edelstahl 1.4404 einbezogen. Deren relevante Berechnungsgrößen und der daraus resultierende Aufwand zur Durchführung der Methode sind in Tabelle 13 aufgeführt. Die Verbrauchsmenge beschreibt dabei die eingesetzte Pulvermenge und bezieht sich auf die Höhe der zu fertigenden Baujobs.

*Tabelle 13: Vergleich des Gesamtaufwands für die drei Referenzwerkstoffe*

Werkstoff	Dichte	Preis	Verbrauchsmenge	Summe Aufwand
-	g/cm <sup>3</sup>	€/kg	g/mm	
AlSi10Mg	2,68	68	70	15.021 €
Ti6Al4V	4,43	250	116	18.008 €
1.4404	7,95	60	208	15.973 €

Die Kostenunterschiede zwischen den Werkstoffen resultieren vor allem aus den volumenspezifischen Pulverpreisen. Diese fallen bei der Titanlegierung am höchsten und beim Edelstahl am geringsten aus.

### 6.6.3.2 Nutzen durch Steigerung der Materialeffizienz

Basierend auf den Ergebnissen aus der Anwendung der Methode in der Nutzungsstufe 2 wird für die Kosten-Nutzen-Berechnung von einer Erhöhung des Recyclinggrades ausgegangen. Bei der Verarbeitung von reaktiven Materialien (z. B. AlSi10Mg) wird häufig eine Limitierung der Nutzungsdauer auf 10 Zyklen vorgesehen. Für das betrachtete Bauteilprogramm bleiben nach dem 10. Zyklus 24,5 % der Ausgangsmasse der Pulvercharge (0,955 kg der ursprünglichen 3,896 kg) als Recyclingpulver übrig. Wird die Maßnahme 4.2 aus Abbildung 66 angewendet, wird die ESUK-Zunahme pro Baujob um 89,1 % reduziert. Der im Rahmen der experimentellen Absicherung überprüfte maximale ESUK-Anteil von 10,5 % (vgl. Unterabschnitt 6.5.1) wird demnach theoretisch nach 91 Zyklen erreicht. Da die Restmenge der Pulvercharge laut Modellierung nach dem 26. Zyklus einen Wert von 100 g unterschreitet, wird dieser Zyklus als neue Beschränkung gewählt. Es wird davon ausgegangen, dass sich eine Wiederaufbereitung von Pulvermengen unter 100 g nicht rentiert. Im Falle einer Beschränkung auf 26 Zyklen werden demnach 93 g der Pulvercharge entsorgt. Durch die Maßnahme 4.2 fallen aufgrund des Absaugens der Prozessspritzer im Bauraum nach dem Prozess weiterhin 4,89 % bzw. 190 g zusätzliche Pulververluste an. Insgesamt ergeben sich für den betrachteten Anwendungsfall durch diese Maßnahme bedingte Verluste von 283 g bzw. 7,3 %. Gleichzeitig wird eine Materialersparnis von 17,2 % der Pulvercharge erzielt. Über die verfestigte Pulvermenge pro Jahr, den Pulverpreis und die Entsorgungskosten für das Pulver kann gemäß Tabelle 14 eine jährliche Einsparung pro LBM-Anlage berechnet werden.

*Tabelle 14: Jährliche Kosteneinsparung pro Anlage für die drei Referenzwerkstoffe durch Erweiterung der Nutzungsbegrenzung von 10 auf 26 Zyklen*

Schritt und Bezeichnung	Einheit	Werte		
		AlSi10Mg	Ti6Al4V	1.4404
Produktive Anlagenlaufzeit	h/Jahr	4.500	4.500	4.500
Aufbaurrate	cm <sup>3</sup> /h	14	12	10
Verarbeitete Pulvermasse pro Jahr	kg/Jahr	168,8	239,2	357,8
Einsparung pro Jahr (bei 17,2 %)	kg/Jahr	29,04	41,15	61,53
Entsorgungskosten	€/kg	10	10	10
<b>Resultierende Kosteneinsparung</b>	<b>€/Jahr</b>	<b>2.265</b>	<b>10.698</b>	<b>4.307</b>

Dazu wird die verarbeitete Pulvermenge pro Jahr für die jeweiligen Werkstoffe näherungsweise bestimmt. Aufgrund von Vorgaben im Bereich der

Arbeitssicherheit sind die betrachteten Pulverwerkstoffe als spezielle Abfallkategorie zu entsorgen. Hierbei wird von einem Aufwand von 10 €/kg ausgegangen. Die resultierende jährliche Kostenersparnis hängt stark vom Preis des jeweiligen Pulverwerkstoffs ab. Für die weitere Berechnung wird von einer Produktion mit drei LBM-Anlagen ausgegangen.

### 6.6.3.3 Amortisation

Die Kostenbilanz für die Anwendung der Methode im Verlauf der Zeit  $k_B(t)$  kann über den einmaligen Aufwand zur Durchführung und die damit verbundene kontinuierliche Kostenersparnis pro Jahr berechnet werden.

$$k_B(t) = k_D - m_E \cdot (k_P + k_{Ent}) \cdot t \quad (6.1)$$

Die Gleichung beinhaltet die Kosten für die Durchführung  $k_D$ , die jährliche Materialersparnis  $m_E$ , den Pulverpreis  $k_P$  sowie die massenspezifischen Entsorgungskosten  $k_{Ent}$ . Für das betrachtete Szenario und die drei Werkstoffe ergeben sich damit die in Abbildung 70 dargestellten Amortisierungszeitpunkte.

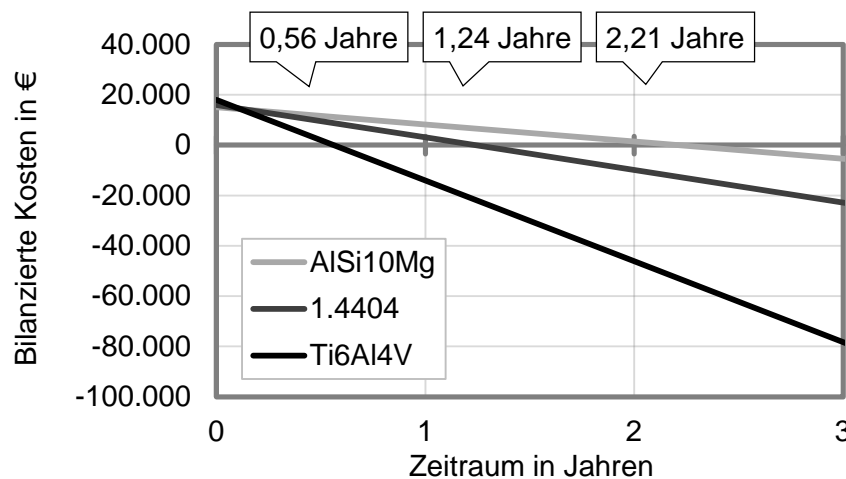


Abbildung 70: Amortisationsrechnung der Anwendung der Methode für den betrachteten Anwendungsfall mit 3 LBM-Anlagen und für die drei Referenzwerkstoffe

Es zeigt sich, dass sich die Anwendung der Methode im betrachteten Fall je nach Material nach ca. 0,6 bis 2,2 Jahren amortisiert. Gerade ein hoher Pulverpreis sorgt für eine hohe Ersparnis und damit eine schnelle Amortisation. Die Ersparnis wird bei teureren Pulvermaterialien wie beispielsweise Kobaltchromlegierungen (über



---

600 €/kg) oder hochwertigeren Titanlegierungen (über 500 €/kg) größer ausfallen. Die Wirtschaftlichkeit verbessert sich weiter, umso mehr LBM-Anlagen betrieben werden und umso mehr Pulvermaterial diese pro Zeiteinheit verarbeiten.

Wenn die Methode eine Reduzierung des Recyclinggrads empfiehlt, kann sich durch die damit verbundene Qualitätsverbesserung auch ein wirtschaftlicher Nutzen ergeben. Die Ausschussquote bei der Produktion mittels Laserstrahlschmelzen liegt aktuell bei ca. 5 % bis 10 % (KRAUSS 2017, LANZA ET AL. 2017) und könnte durch diese Maßnahme reduziert werden. Durch eine Qualitätsverbesserung kann weiterhin der Bedarf für Begleitproben verringert werden, die nach der Fertigung zerstörend geprüft werden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Anforderungen an die Methode erfüllt sind und dass in allen betrachteten Szenarien eine Amortisation in unter 3 Jahren erreicht wird. Gerade bei strengen Limitierungen des Recyclings und bei hochwertigen Werkstoffen bietet die Methode ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung. Für eine ökologische Bewertung der Einsparung von Pulververlusten anhand des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks sei weiterführend auf LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018B verwiesen.

## **6.7 Fazit**

In diesem Kapitel wurde eine Methode für die Bewertung von Pulverrecyclingstrategien beim Laserstrahlschmelzen vorgestellt. Sie dient der Entwicklung und Evaluierung einer qualitätsorientierten Pulverrecyclingstrategie und erfüllt somit die Zielsetzung dieser Arbeit. Die Methode wurde anhand der zwei Nutzungsstufen angewendet und diskutiert. Abschließend wurden der Erfüllungsgrad der Anforderungen und die Wirtschaftlichkeit der Anwendung der Methode evaluiert.

Abbildung 71 fasst die zentralen Ergebnisse der Anwendung der Methode zusammen. Es hat sich gezeigt, dass sich mechanische Kennwerte teilweise durch die Alterung des Pulvers geringfügig verschlechtern. Die Anforderungen an den konventionell verarbeiteten Werkstoff werden allerdings durchgehend übertroffen. Anhand des Beispielbauteils wurde gezeigt, dass die Positionierung des Bauteils im Bauraum eine zentrale Rolle bei der Einbringung von Prozessspritzern spielt. Dieses Erkenntnis kann allgemein bei der Datenvorbereitung berücksichtigt werden, um durch eine gezielte Anordnung von Bauteilen auf der Baufläche negative Einflüsse von Prozessspritzern zu vermeiden. Aus dem morphologischen Kasten der

Pulverrecyclingstrategie konnten Optimierungsmaßnahmen abgeleitet und anhand des Modells hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und bedingten Pulververlusten analysiert werden. Die Maßnahme 4.2 zeichnet sich durch eine starke Verlangsamung der Pulveralterung bei gleichzeitig geringen Pulververlusten aus.

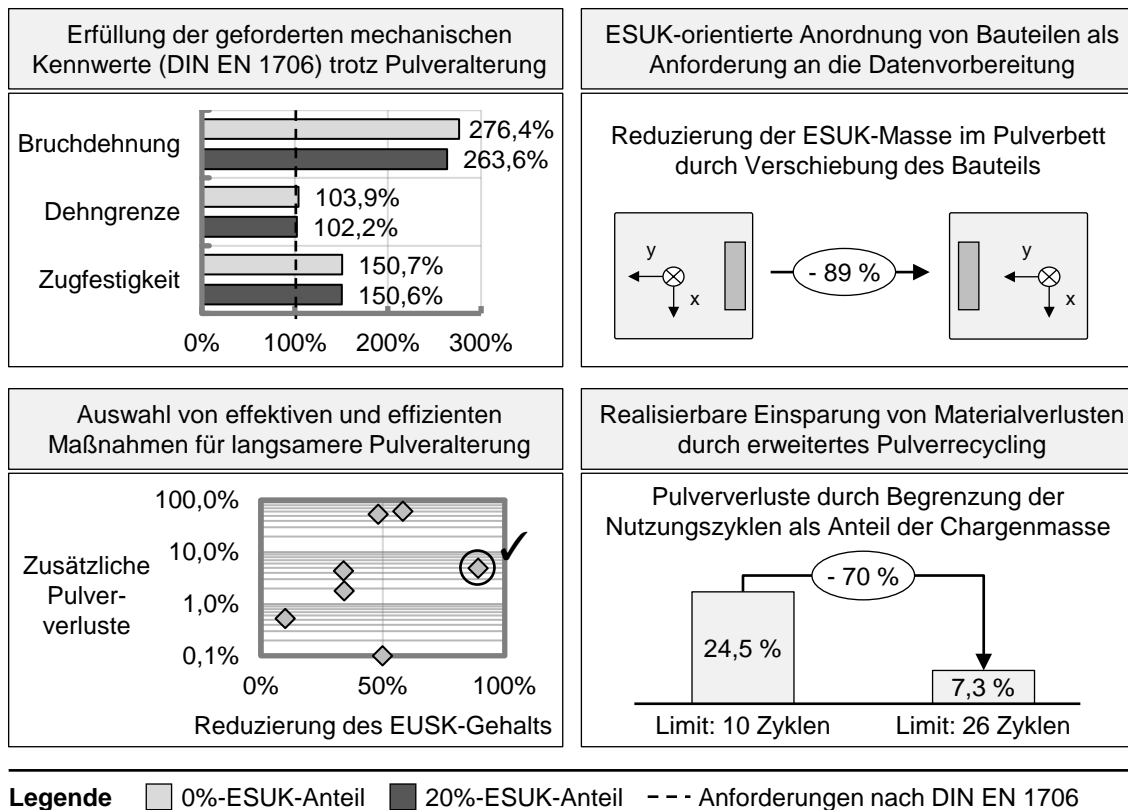


Abbildung 71: Zentrale Ergebnisse der Anwendung der Methode

Durch Anwendung der Maßnahme kann die bestehende Zyklenbegrenzung von 10 auf 26 Zyklen verschoben werden, was die Materialeffizienz bei der Verarbeitung der Pulvercharge erhöht.

Die Methode kann insgesamt dafür genutzt werden, um die Eignung von Pulverrecyclingstrategien beim Laserstrahlschmelzen in geplanten Fertigungsszenarien präskriptiv zu bewerten. Sie bietet weiterhin quantifizierte Stellhebel, um das Recycling effektiv und effizient einzuschränken, falls die Bauteilqualität bei vermehrtem Pulverrecycling gefährdet sein sollte. Somit befähigt die Methode Anwender der Technologie zur Maximierung des Pulverrecyclings bei gleichzeitiger Einhaltung eines vorgegebenen Qualitätsniveaus.

---

## 7 Schlussbetrachtung

### 7.1 Zusammenfassung

Pulverrecycling wird bei der Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen aus Vorsicht aktuell nur begrenzt angewendet. Der Grad der Wiederverwendung prägt die Wirtschaftlichkeit und Ökologie der Technologie. Daher wurde in dieser Arbeit das Ziel verfolgt, ein Vorgehen zur Qualifizierung eines qualitätsorientierten Pulverrecyclings zu entwickeln.

Zur Erreichung des Ziels wurden die durch das Recycling hervorgerufenen **Änderungseffekte** auf den Pulverzustand hergeleitet, anhand von drei Werkstoffen experimentell analysiert und anschließend hinsichtlich Vermeidbarkeit und Relevanz für die Qualitätssicherung bewertet. Es hat sich gezeigt, dass sich die meisten Effekte bei den drei betrachteten Pulvermaterialien ähnlich verhalten. Andere Mechanismen, wie beispielsweise die Veränderung der chemischen Zusammensetzung durch Einbringung von Prozessspritzern, zeigten hingegen materialspezifische Ausprägungen. Das verwendete Vorgehen kann für die Analyse des Alterungsverhaltens weiterer Werkstoffe genutzt werden. Basierend auf dem Verständnis der Effekte konnten Richtlinien zu deren Vermeidung abgeleitet werden. Die Einbringung von Prozessspritzern in das Pulver hat sich bei allen drei Werkstoffen als zentraler und prozessinhärenter Effekt herausgestellt, so dass dieser aus Sicht der Qualitätssicherung zu berücksichtigen ist.

Es wurde ein diskretes mathematisches **Modell** entwickelt, das diesen Effekt und damit verbundene Änderungen des Pulverzustands abbildet. Ergänzend wurde ein Vorgehen zur Kalibrierung dieses Modells entwickelt. Die Validierung hat gezeigt, dass das Modell zusammen mit dem dafür entwickelten Vorgehen zur Kalibrierung eine hohe Vorhersagegenauigkeit des Verlaufs des Elementgehalts über ein geplantes Produktionsprogramm aufweist. Über die Kalibrierung lässt sich die räumliche Verteilung von entstehenden Prozessspritzern beschreiben, die gleichzeitig ein wesentliches Charakteristikum bei der Auslegung von LBM-Anlagen darstellt.

Basierend auf diesem Modell wurde eine **Methode** für die Bewertung des Vorgehens beim Pulverrecycling entwickelt. Diese ermöglicht die Auswahl einer Pulverrecyclingstrategie, die eine Wiederverwendung des Pulvers in einem geplanten Produktionsprogramm ohne Unterschreitung von Qualitätsgrenzen gewährleistet. Das Vorgehen beinhaltet einen Baustein zur experimentellen

Absicherung, in dem die Wirkung der Änderung des Pulverzustands auf ausgewählte Bauteileigenschaften bestimmt werden kann. Die Methode kann in zwei Nutzungsstufen eingesetzt werden. In der ersten Stufe wird die Wirkung des höchstmöglichen Recyclings bewertet. Ergibt sich hierbei eine Gefährdung der geforderten Bauteileigenschaften, wird in der zweiten Stufe die Voraussetzung für eine situationsspezifische Anpassung der Pulverrecyclingstrategie auf geplante Produktionsprogramme geschaffen. Die Methode wurde anhand von Anwendungsbeispielen durchgeführt und auf dieser Basis evaluiert. Die Anwendung der Methode für die Verarbeitung von AlSi10Mg in der Referenzanwendung zeigt, dass Pulverrecycling in diesem Fall bis zu einem ESUK-Anteil von 20 % umsetzbar ist, ohne dabei die Anforderungen an den konventionell hergestellten Werkstoff zu unterschreiten. Die Pulverrecyclingstrategie kann folglich so angepasst werden, dass die Materialverluste aufgrund von begrenztem Recycling um 70 % reduziert werden.

Bei der Wiederverwendung des AlSi10Mg-Pulvers im Rahmen der Anwendung der Methode konnte ein deutlicher Anstieg des Sauerstoffgehalts um 37,8 % beobachtet werden. Hinsichtlich der Dauerfestigkeit zeigt sich dadurch eine leichte Verschlechterung des Verhaltens im Bereich geringer Spannungen und sehr hoher Lastspielzahlen im Vergleich zu Neupulver. Bei der Anwendung der Methode hat sich weiterhin gezeigt, dass die Optimierung der Bauteilanordnung, die Entsorgung des Bauraumpulvers sowie das Auffrischen des Pulvers wirksame Maßnahmen darstellen, um die Pulveralterung zu verlangsamen. Die Methode ermöglicht es im Einzelfall, die Unsicherheiten bei der Wiederverwendung des Pulvers zu minimieren und befähigt so zum Einsatz eines qualitätsorientierten Pulverrecyclings beim Laserstrahlschmelzen.

Mit dem Anteil eingebrachter Prozessspritzer im Pulver (ESUK-Anteil) wurde eine Kennzahl zur Beschreibung des Alterungszustands des Pulvers vorgeschlagen. Gemäß den Ergebnissen aus dieser Arbeit kann darüber der Alterungszustand präziser beschrieben werden als über die Anzahl der Verarbeitungszyklen, die aktuell breite Verwendung findet.

### **7.2 Einordnung und Reflexion**

Die Methode und das Modell wurden in den Abschnitten 5.7.2 und 6.6.2 anhand ihres Geltungsbereichs und der Systemgrenze kritisch reflektiert. Ergänzend wird in diesem Abschnitt das Vorgehen der gesamten Arbeit eingeordnet und reflektiert.

---

Im forschungstheoretischen Sinne nach KUBICEK (1976) wurden ein **heuristischer Bezugsrahmen** anhand von Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und Technik sowie durch systematische Experimente erarbeitet und konkretisiert. Es wurde auf dieser Wissensbasis ein zentraler Effekt ausgewählt, der auf Grundlage von Beobachtungen der experimentellen Realität modelliert wurde. In dem numerischen Ersatzmodell wird ein Sachverhalt abstrahiert dargestellt, so dass eine präskriptive Aussage über das Verhalten des Betrachtungsgegenstands getroffen werden kann. Aufgrund der fallspezifischen Natur der adressierten Problematik wurde deduktiv eine Methode entwickelt, die nach Anwendung im Einzelfall gültige Aussagen liefern kann. Insgesamt stellt das Vorgehen in der Arbeit eine Kombination aus induktiven und deduktiven Schritten dar. So wurden bei der Erstellung des Modells, ausgehend von den Untersuchungen auf einer spezifischen LBM-Anlage, Verallgemeinerungen für beliebige LBM-Anlagen getroffen. Darüber wird die Gültigkeit der Ergebnisse eingegrenzt. Hingegen wurde bei der Identifikation der hypothetischen Änderungseffekte ein deduktiver Ansatz genutzt, um ausgehend von theoretischen und allgemeinen Einwirkungen auf das Pulver konkrete Experimente zu deren Validierung abzuleiten.

Aus der Vorgehensweise folgt der **Gültigkeitsbereich** der Ergebnisse der Arbeit. Aufgrund der Validierung von Modell und Methode anhand von Anwendungsbeispielen kann sich eine Falsifizierung durch eine Änderung des Werkstoffs, der Anlage oder der verwendeten Prozessparameter ergeben. Die Änderung nur eines Faktors kann ein anderes Prozess- und Werkstoffverhalten bedingen. Da in der Methode ein Modell verwendet wird, kann diese nur valide Ergebnisse liefern, wenn der Anwendungsfall für die Modellierung gültig ist. Ergebnisse aus Kapitel 4 beziehen sich auf industrielle LBM-Anlagen nach aktuellem Stand der Technik (vgl. Unterabschnitt 2.2.1.3). Der Einsatz neuer Anlagenkonzepte kann daher die Gültigkeit der Erkenntnisse einschränken, beispielsweise durch Einsatz von Vorheiztemperaturen über 700 °C.

Die **Grundannahme** der Fokussierung auf ein maximales Pulverrecycling ist nicht zwangsläufig uneingeschränkt zweckmäßig. Nach hohen Zyklenzahlen bleiben von Pulverchargen häufig nur geringe Anteile übrig. Es ist eine Mindestmenge zu beachten, ab der sich der Aufwand zur Wiederverwendung wirtschaftlich lohnt. Dieser hängt vom Pulverpreis und dem Aufwand zu Wiederaufbereitung ab. Die Wirtschaftlichkeit des Ansatzes wird weiterhin von der Frage beeinflusst, ob das Pulver nach der Zyklengrenzung sinnvoll anderweitig verwendet werden kann, beispielsweise zur Fertigung von Prototypen abseits der Produktion.

Die adressierten **Wissenschaftsgebiete** umfassen die Pulverqualität, die Werkstofftechnik, das Prozessverständnis und die Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen sowie die betriebliche Materialdisposition und -einsatzplanung.

### 7.3 Ausblick

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit können weiterführende Forschungsthemen abgeleitet werden.

Für die Bewertung des Pulverrecyclings sind Auswirkungen der Änderungen von Pulvereigenschaften auf die Bauteilqualität maßgeblich. Dabei besteht Unsicherheit über die **Wirkung ausgewählter Pulvereigenschaften auf das Bauteilverhalten**. Dies gilt im Besonderen für die Relevanz der adsorbierten Feuchtigkeit im Pulver. In der Literatur wird von einem schädlichen Einfluss ausgegangen, allerdings wurde dieser bisher kaum experimentell belegt. Auch über die Rolle der Partikelform für das Verhalten des Pulvers im LBM-Prozess bestehen bisher nur wenig experimentell abgesicherte Erkenntnisse. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass Verschmutzungen von Pulverchargen durch eingebrachte Fremdpartikel (z. B. Kreuzkontaminationen) in der Praxis auftreten können. Die Bedeutung dieser Änderung des Pulverzustands für die Bauteilqualität wurde bisher kaum untersucht.

In **Kapitel 4** wurde das Alterungsverhalten für drei Referenzwerkstoffe beim Laserstrahlschmelzen charakterisiert. Gleichzeitig ist das entsprechende Verhalten weiterer Werkstoffe (z. B. Magnesium- und Kupferlegierungen) noch weitgehend ungeklärt. Das verwendete Vorgehen bei der Untersuchung der hypothetischen Änderungseffekte kann auf diese und weitere Werkstoffe übertragen werden. Eine Anpassung von Prozessparametern in der laufenden Produktion wurde ausgeschlossen. Weiterhin wird die Eingrenzung getroffen, dass die Anlagentechnik nicht verändert wird und prozessinhärente Effekte somit nicht vermieden werden können. Beide Ansätze ermöglichen jedoch eine direkte Einflussnahme auf die Entstehung und Einbringung von Prozessspritzern während des Baujobs und bieten daher ein hohes Potenzial zur Reduzierung oder Vermeidung dieses Alterungseffektes. So könnte erstens die Schutzgasströmung je nach Belichtungsort auf der Baufläche lokal verstärkt werden, beispielsweise durch selektiv verschließbare SGS-Einlässe und -Auslässe, um Spritzer besser vom Entstehungsort abtransportieren zu können. Zweitens könnten durch einen selektiven Absaugmechanismus, der mit einer Kinematik über die Baufläche bewegt wird,

---

Spritzer lokal am Entstehungsort abgesaugt werden. Die Alterung des Pulvers durch diesen Effekt könnte damit nahezu vermieden werden.

Im Hinblick auf die **Modellierung in Kapitel 5** stellt sich die Frage, inwieweit die im Rahmen der Kalibrierung gemessenen Spritzereinbringungsprofile auf andere Prozessparameter, Werkstoffe oder Anlagen übertragen werden können. Eine Übertragbarkeit der Profile könnte die Wirtschaftlichkeit bei der Anwendung der Methode weiter steigern. Der genaue Einfluss der Stützstrukturen bei den Blöcken 2 und 3 auf die Messergebnisse bei der Kalibrierung kann anhand der Validierung nicht abschließend bewertet werden. Aufgrund des geringen Anteils an der belichteten Fläche kann davon ausgegangen werden, dass die Einwirkung auf die Ergebnisse vernachlässigbar ist. Diese Annahme könnte weiterführend anhand der Durchführung des Kalibrierungsbaujobs ohne Blöcke validiert werden.

Die **Methode (Kapitel 6)** kann in mehrere Richtungen weiterentwickelt werden. So könnte das Vorgehen auf weitere additive Fertigungsverfahren angepasst werden. Aufgrund der technologischen Ähnlichkeit wäre beispielsweise eine Adaption für das Elektronenstrahlschmelzen denkbar. Eine noch offene Fragestellung besteht in der Übertragbarkeit der experimentellen Ergebnisse aus der Anwendung der Methode auf andere Anwendungsfälle. Bei einer hohen Übertragbarkeit könnten zentrale Kennwerte wie der maximal tolerierbare ESUK-Anteil in Normen und Standards überführt werden. Hierzu wäre die Methode auf diverse Parametersätze, Anlagen oder Werkstoffe anzuwenden. Weiterhin hat sich gezeigt, dass eine gezielte Beeinflussung des Alterungsverlaufs über das Produktionsprogramm möglich ist. Dies bildet einen Optimierungsansatz auf Ebene der Produktionsplanung und -steuerung, der weiterführend untersucht werden kann.

Ein weiterer Ansatzpunkt liegt in der **Kompensation der Pulveralterung**. Spezielle Auffrischpulver bieten eine Möglichkeit, Änderungseffekte durch Zumischen auszugleichen. Weiterhin kann eine Kompensation durch neue Aufbereitungsschritte in der Pulverprozesskette erreicht werden. Beispielsweise bietet das Spherodisieren von Partikeln in Plasma eine Möglichkeit zur gezielten Reduzierung von bestimmten Elementgehalten.

Alle vorgestellten Lösungsbausteine betrachten eine Monomaterialverarbeitung beim Laserstrahlschmelzen. Im Hinblick auf das Pulverrecycling bei der **Multimaterialverarbeitung** wäre das Vorgehen um weitere hypothetische Änderungseffekte zu erweitern. Der Prozessablauf stellt hierbei zusätzliche Anforderungen an das Pulverrecycling, mit denen sich neue Forschungsfelder

eröffnen. Im Besonderen stellt die Vermischung der Pulvermaterialien im Prozess eine Herausforderung dar, die einen wesentlichen Hebel für die Wirtschaftlichkeit der Technologie darstellt.



---

## Literatur

ACATECH 2016

acatech: Additive Fertigung. Stellungnahme. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. 1. Aufl. Halle (Saale), München, Mainz: 2016. ISBN: 978-3-8047-3676-4.

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.

ARDILA ET AL. 2014

Ardila, L. C.; Garcíandia, F.; González-Díaz, J. B.; Álvarez, P.; Echeverría, A.; Petite, M. M.; Deffley, R.; Ochoa, J.: Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting. *Physics Procedia* 56 (2014), S. 99-107.

ASGARI ET AL. 2017

Asgari, H.; Baxter, C.; Hosseinkhani, K.; Mohammadi, M.: On microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg\_200C using recycled powder. *Materials Science and Engineering: A* 707 (2017), S. 148-158.

ASTM F3001-14

ASTM F3001-14: Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion: ASTM International 2014.

ASTM E466-15

ASTM E466-15: Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials: ASTM International 2015.

BARCLIFT ET AL. 2016

Barclift, M.; Joshi, S.; Simpson, T.; Dickman, C.: Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstock in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. Austin, Texas, 2016. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

BAUER ET AL. 2016

Bauer, D.; Borchers, K.; Burkert, T.; Ciric, D.; Cooper, F.; Ensthaler, J.; Gaub, H.; Gittel, H.-J.; Grimm, T.; Hillebrecht, M.; Kluger, P.; Klöden, B.; Kochan, D.; Kolb, T.; Löber, L.; Lenz, J.; Marquardt, E.; Munsch, M.; Müller, A.; Müller-Lohmeier, K.; Müller-ter Jung, M.; Schaefflein, F.; Seidel, C.; Schwandt, H.; van de Vrie, R.; Witt, G.; Zäh, M.: Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren. 1. Aufl.

Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure 2016. ISBN: 978-3-931384-82-1. (VDI-Handlungsfelder).

BAUER ET AL. 2017

Bauer, D. M.; Schwarzenböck, E.; Ludwig, I.; Schupp, N.; Palm, F.; Witt, G.: Investigations of aging behaviour for aluminium powders during an atmosphere simulation of the LBM process. Powder Metallurgy 60 (2017) 3, S. 175-183.

BIDARE ET AL. 2018

Bidare, P.; Bitharas, I.; Ward, R. M.; Attallah, M. M.; Moore, A. J.: Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion. Acta Materialia 142 (2018), S. 107-120.

BOISSERÉE 2018

Boisserée, K.: Alterungsverhalten von Metallpulvern aus AlSi10Mg, Ti6Al4V und 1.4404 durch Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen. Masterarbeit, Technische Universität München, 2018.

BOLEY ET AL. 2015

Boley, C. D.; Khairallah, S. A.; Rubenchik, A. M.: Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing. Applied optics 54 (2015) 9, S. 2477-2482.

BRAESS & SEIFFERT 2005

Braess, H. H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 4., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2005. ISBN: 3528331143. (ATZ/MTZ Fachbuch).

BRÜGGEMANN & BREMER 2015

Brüggemann, H.; Bremer, P.: Grundlagen Qualitätsmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015. ISBN: 978-3-658-09220-7.

BUCHBINDER ET AL. 2010

Buchbinder, D.; Meiners, W.; Brandl, E.; Palm, F.; Müller-Lohmeier, K.; Wolter, M.; Over, C.; Moll, W.; Weber, J.; Skrynecki, N.; Gradl, J.; Neubert, V.: Abschlussbericht: Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion. 2010.

CAVIEZEL ET AL. 2017

Caviezel, C.; Grünwald, R.; Ehrenberg-Silies, S.; Kind, S.; Jetzke, T.; Bovenschulte, M.: Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck). Bad Honnef: 2017.

CORDOVA ET AL. 2017

Cordova, L.; Campos, M.; Tinga, T.: Assessment of Moisture Content and its

---

Influence on Laser Beam Melting Feedstock, Euro PM2017 Congress. Mailand, Italien, 2017. (Euro PM2017 Conference Proceeding).

DAWES ET AL. 2015

Dawes, J.; Bowerman, R.; Trepleton, R.: Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Johnson Matthey Technology Review 59 (2015) 3, S. 243-256.

DIN 50100

Deutsches Institut für Normung 50100: Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile: 12.2016.

DIN 55350-11

Deutsches Institut für Normung 55350-11: Begriffe zum Qualitätsmanagement - Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005: 05.2008.

DIN 66165-1

Deutsches Institut für Normung 66165-1: Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 1: Grundlagen: 10.2015.

DIN EN 1706

Deutsches Institut für Normung 1706: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gussstücke - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften: 12.2013.

DIN EN 481

Deutsches Institut für Normung 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel: 1993.

DIN EN 60812

Deutsches Institut für Normung 60812: Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA): 08.2015.

DIN EN ISO 6892-1

Deutsches Institut für Normung 6892-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur: 02.2017.

DIN EN ISO 9000

Deutsches Institut für Normung 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe: Deutsches Institut für Normung (DIN) 11.2015.

DIN ISO 3310-1

Deutsches Institut für Normung 3310-1: Analysensiebe - Technische

Anforderungen und Prüfung - Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe (ISO 3310-1:2016): 11.2017.

DIN ISO 9276-1

Deutsches Institut für Normung 9276-1: Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 1: Grafische Darstellung (ISO 9276-1:1998): 09.2014.

DIN ISO 9276-6

Deutsches Institut für Normung 9276-6: Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln: 01.2012.

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.

ESCHNER ET AL. 2019

Eschner, E.; Staudt, T.; Schmidt, M.: 3D particle tracking velocimetry for the determination of temporally resolved particle trajectories within laser powder bed fusion of metals. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 1(3), 2019.

GEBHARDT 2016

Gebhardt, A.: *Additive Manufacturing. 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. München: Hanser 2016. ISBN: 978-3-446-44539-0. (Hanser eLibrary).

GIBSON ET AL. 2015

Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: *Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. 2. Aufl. New York: Springer 2015. ISBN: 978-1-4939-2113-3.

GRAINGER 2016

Grainger, L.: *Investigating Ti6Al4V metal powder re-use in additive manufacturing*. 2016.

GUNENTHIRAM ET AL. 2018

Gunenthiram, V.; Peyre, P.; Schneider, M.; Dal, M.; Coste, F.; Koutiri, I.; Fabbro, R.: Experimental analysis of spatter generation and melt-pool behavior during the powder bed laser beam melting process. *Journal of Materials Processing Technology* 251 (2018), S. 376-386.

---

GÜRTLER ET AL. 2014

Gürtler, F.; Karg, M.; Dobler, M.; Kohl, S.; Tzivlisky, I.; Schmidt, M.: Influence of powder distribution on process stability in laser beam melting: Analysis of melt pool dynamics by numerical simulations. Texas, USA: 2014. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

HANN 2016

Hann, B.: Powder Reuse and Its Effects on Laser Based Powder Fusion Additive Manufactured Alloy 718. SAE Int. J. Aerosp. 9 (2) (2016), S. 209-213.

HOELZLE ET AL. 2017

Hoelzle, D.; Peng, H.; Ghasri-Khouzani, M.; Gong, S.; Attardo, R.; Ostiguy, P.; Gatrell, B.; Budzinski, J.; Tomonto, C.; Neidig, J.; Shankar, R.; Billo, R.; Go, D.: Expert survey to understand and optimize part orientation in direct metal laser sintering. Austin, Texas, 2017. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

HORNBOGEN ET AL. 2012

Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.: Werkstoffe. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-642-22560-4.

HRYHA ET AL. 2016

Hryha, E.; Shvab, R.; Bram, M.; Bitzer, M.; Nyborg, L.: Surface chemical state of Ti powders and its alloys: Effect of storage conditions and alloy composition. Applied Surface Science 388 (2016), S. 294-303.

HRYHA ET AL. 2017

Hryha, E.; Shvab, R.; Gruber, H.; Leicht, A.; Nyborg, L.: Surface Oxide State on Metal Powder and its Changes during Additive Manufacturing: an Overview, Euro PM2017 Congress. Mailand, Italien, 2017. (Euro PM2017 Conference Proceeding).

HUSZAR 2018

Huszar, M.: Entwicklung eines Modells zur Charakterisierung der räumlichen Verteilung von Prozessspritzern beim Laserstrahlschmelzen. Masterarbeit, Technische Universität München, 2018.

JACOB ET AL. 2017

Jacob, G.; Brown, C. U.; Donmez, M. A.; Watson, S. S.; Slotwinski, J.: Effects of powder recycling on stainless steel powder and built material properties in metal powder bed fusion processes. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology (NIST) 2017.

JAHN ET AL. 2015

Jahn, S.; Kahlenberg, R.; Straube, C.; Müller, R.; Sändig, S.: Empfehlungen zur

Steigerung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschmelzen. Rapid.Tech 2015 (2015).

KAPLAN & POWELL 2011

Kaplan, A. F.; Powell, J.: Spatter in laser welding. Journal of Laser Applications 23 (2011) 3, S. 32005.

KARAPATIS ET AL. 1999

Karapatis, N.; Egger, G.; Gygax, P.; Glardon, R.: Optimization of Powder Layer Density in Selective Laser Sintering, Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, 1999. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

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.

KRAUSS 2017

Krauss, H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung. München: Herbert Utz Verlag 2017. ISBN: 3831646287. (Forschungsberichte IWB 325).

KRIEWALL ET AL. 2017

Kriewall, C.; Sutton, A.; Karnati, S.; Newkirk, J.; Leu, M.: Effects of Area Fraction and Part Spacing on Degradation of 304L Stainless Steel Powder in Selective Laser Melting, Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, 2017. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

KUBICEK 1976

Kubicek, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. Berlin: Inst. für Unternehmensführung im Fachbereich Wirtschaftswiss. d. Freien Univ 1976. ISBN: 9783883980164. (Arbeitspapier Nr. 16).

LADEWIG ET AL. 2016

Ladewig, A.; Schlick, G.; Fisser, M.; Schulze, V.; Glatzel, U.: Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process. Additive Manufacturing 10 (2016), S. 1-9.

LANZA ET AL. 2017

Lanza, G.; Kopf, R.; Zaiß, M.; Stricker, N.; Eschner, N.; Jacob, A.; Yang, S.;

---

Schönle, A.; Webersinke, Lisa; Wirsig, Lisa: Laser-Strahlschmelzen - Technologie mit Zukunftspotenzial. Ein Handlungsleitfaden. KIT - Karlsruhe Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik. 1. Aufl. Karlsruhe: 2017. ISBN: 978-3-00-056913-5.

LI ET AL. 2010

Li, R.; Shi, Y.; Wang, Z.; Wang, L.; Liu, J.; Jiang, W.: Densification behavior of gas and water atomized 316L stainless steel powder during selective laser melting. *Applied Surface Science* 256 (2010) 13, S. 4350-4356.

LINDEMANN ET AL. 2012

Lindemann, C.; Jahnke, U.; Moi, M.; Koch, R.: Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. Austin, Texas, 2012. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

LINDEMANN 2016

Lindemann, U.: Handbuch Produktentwicklung: Carl Hanser Verlag GmbH 2016. ISBN: 978-3446445185.

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.

LOUVIS ET AL. 2011

Louvis, E.; Fox, P.; Sutcliffe, C. J.: Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 2, S. 275-284.

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2015

Lutter-Günther, M.; Seidel, C.; Kamps, T.; Reinhart, G.: Implementation of Additive Manufacturing Business Models. *Applied Mechanics and Materials* 794 (2015), S. 547-554.

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2016A

Lutter-Guenther, M.; Schwer, F.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Effects on Properties of Metal Powders for Laser Beam Melting Along the Powder Process Chain, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, DDMC. Berlin, 2016.

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2016B

Lutter-Günther, M.; Hofmann, A.; Hauck, C.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Quantifying Powder Losses and Analyzing Powder Conditions in order to Determine Material Efficiency in Laser Beam Melting. *Applied Mechanics and Materials* 856 (2016), S. 231-237.

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018A

Lutter-Günther, M.; Bröker, M.; Mayer, T.; Lizak, S.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Spatter formation during laser beam melting of AlSi10Mg and effects on powder quality. *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 33-38.

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018B

Lutter-Günther, M.; Gebbe, C.; Kamps, T.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Powder recycling in laser beam melting: strategies, consumption modeling and influence on resource efficiency. *Production Engineering* 137 (2018) 2, S. 1573.

LY ET AL. 2017

Ly, S.; Rubenchik, A. M.; Khairallah, S. A.; Guss, G.; Matthews, M. J.: Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Scientific reports* 7 (2017) 1, S. 4085.

MARCU ET AL. 2012

Marcu, T.; Todea, M.; Gligor, I.; Berce, P.; Popa, C.: Effect of surface conditioning on the flowability of Ti6Al7Nb powder for selective laser melting applications. *Applied Surface Science* 258 (2012) 7, S. 3276-3282.

MEINERS 1999

Meiners, W.: *Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe*. Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-8265-6571-1. (Berichte aus der Lasertechnik).

MOYLAN ET AL. 2013

Moylan, S.; Slotwinski, J.; Cooke, A.; Jurens, K.; Donmez, M. A.: Lessons learned in establishing the NIST metal additive manufacturing laboratory: National Institute of Standards and Technology (NIST) 2013.

MUÑIZ-LERMA ET AL. 2018

Muñiz-Lerma, J. A.; Nommeots-Nomm, A.; Waters, K. E.; Brochu, M.: A Comprehensive Approach to Powder Feedstock Characterization for Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Case Study on AlSi7Mg. *Materials* 11 (2018) 12.

NASA 2017A

National Aeronautics and Space Administration 2017: Specification for Control and Qualification of Laser Powder Bed Fusion Metallurgical Processes, MSFC Technical Standard 3717 Baseline: 17.10.2017.

NASA 2017B

National Aeronautics and Space Administration 2017: Standard for Additively



---

Manufactured Spaceflight Hardware by Laser Powder Bed Fusion in Metals, MSFC Technical Standard 3716 Baseline: 18.10.2017.

NOKHODCHI 2005

Nokhodchi, A.: Effect of Moisture on compaction and compression. *Pharmaceutical Technology* 29(1) (2005), S. 46-66.

NOVOTNAK & LHERBIER 2015

Novotnak, D.; Lherbier, L.: The Impact of Recycling AM Powders, Euro PM2015 Congress. Reims, Frankreich: 2015. (Euro PM2015 Conference Proceeding).

OLAKANMI ET AL. 2015

Olakanmi, E. O.; Cochrane, R. F.; Dalgarno, K. W.: A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science* 74 (2015), S. 401-477.

O'LEARY ET AL. 2015

O'Leary, R.; Setchi, R.; Prickett, P.: An Investigation into the Recycling of Ti-6Al-4V Powder Used Within SLM to Improve Sustainability, 2nd International Conference on Sustainable Design and Manufacturing. Sevilla, Spanien, 12-14 April 2015.

OSTERMANN 2014

Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014. ISBN: 978-3-662-43806-0.

PATERNINA 2014

Paternina, J.: Preventing moisture caking, the unwanted agglomeration. *Powder and Bulk Engineering Magazine* 04 (2014).

PAUL 2018

Paul, I.: Influence of Increased Oxygen due to Spatter Inclusion on the Fatigue Resistance of AlSi10Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, 2018.

PILLER ET AL. 2018

Piller, F.; Poprawe, R.; Schleifenbaum, J.; Schuh, G.; Barg, S.; Dölle, C.; Riesener, M.: Introducing a Holistic Profitability Model for Additive Manufacturing: An Analysis of Laser-powder Bed Fusion, *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2018, S. 1730-1735

REHME 2009

Rehme, O.: Cellular design for laser freeform fabrication. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier 2009. ISBN: 9783869552736. (Schriftenreihe Lasertechnik Bd. 4).

REPOSSINI ET AL. 2017

Repossini, G.; Laguzza, V.; Grasso, M.; Colosimo, B. M.: On the use of spatter signature for in-situ monitoring of Laser Powder Bed Fusion. Additive Manufacturing 16 (2017), S. 35-48.

SARTIN ET AL. 2017

Sartin, B.; Pond, T.; Griffith, B.; Everhart, W.; Elder, L.; Wenski, E.; Cook, C.; Wieliczka, D.; King, W.; Rubenchik, A.: 316L Powder Reuse for Metal Additive Manufacturing, Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, 2017. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

SCHATT ET AL. 2007

Schatt, W.; Wieters, K.-P.; Kieback, B.: Pulvermetallurgie: Springer Berlin Heidelberg 2007. ISBN: 978-3-540-23652-8.

SCHNIEDENHARN & SCHLEIFENBAUM 2018

Schniedenharn, M.; Schleifenbaum, J.: On the Correlation of the Shielding Gas Flow in L-PBF Machines with Part Density, Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, DDMC. Berlin, 2018.

SCHNIEDENHARN ET AL. 2018

Schniedenharn, M.; Wiedemann, F.; Schleifenbaum, J.: Visualization of the shielding gas flow in SLM machines by space-resolved thermal anemometry. Rapid Prototyping Journal, 24 (2018), S. 1296-1304.

SCHULZE 2014

Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014. ISBN: 978-3-642-53884-1.

SCHWEIER 2016

Schweier, M.: Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation. München: Herbert Utz Verlag 2016. ISBN: 9783831645367. (Forschungsberichte IWB 310).

SEHRT 2010

Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Aachen: Shaker 2010. ISBN: 3832292292.

---

SEYDA ET AL. 2012

Seyda, V.; Kaufmann, N.; Emmelmann, C.: Investigation of Aging Processes of Ti-6Al-4 V Powder Material in Laser Melting. *Physics Procedia* 39 (2012), S. 425-431.

SEYDA ET AL. 2014

Seyda, V.; Herzog, D.; Emmelmann, C.; Jahn, S.; Sändig, S.: On the Treatment of Ti-6Al-4V Powder in Laser Melting, *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC*. Berlin, 2014.

SEYDA ET AL. 2017

Seyda, V.; Herzog, D.; Emmelmann, C.: Relationship between powder characteristics and part properties in laser beam melting of Ti-6Al-4V, and implications on quality. *Journal of Laser Applications* 29 (2017) 2, S. 22311.

SEYDA 2018

Seyda, V.: *Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018. ISBN: 978-3-662-58232-9.

SHVAB ET AL. 2016

Shvab, R.; Leicht, A.; Hryha, E.; Nyborg, L.: Characterization of the Virgin and Recycled Nickel Alloy HX Powder Used for Selective Laser Melting, *World PM 2016*. Hamburg, 2016.

SIMONELLI ET AL. 2015

Simonelli, M.; Tuck, C.; Aboulkhair, N.; Maskery, I.; Ashcroft, I.; Wildman, R.; Hague, R.: A Study on the Laser Spatter and the Oxidation Reactions During Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A* (2015) Volume 46, Issue 9, S. 3842-3851.

SKRYNECKI 2010

Skrynecki, N.: *Kundenorientierte Optimierung des generativen Strahlschmelzprozesses*. Aachen: Shaker 2010. ISBN: 9783832292171.

SLOTWINSKI ET AL. 2014

Slotwinski, J. A.; Garboczi, E. J.; Stutzman, P. E.; Ferraris, C. F.; Watson, S. S.; Peltz, M. A.: Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 119 (2014), S. 460.

SLOTWINSKI & GARBOCZI 2015

Slotwinski, J. A.; Garboczi, E. J.: Metrology Needs for Metal Additive Manufacturing Powders. JOM 67 (2015) 3, S. 538-543.

SPIERINGS & LEVY 2009

Spierings, A.; Levy, G.: Comparison of density of stainless steel 316L parts produced with selective laser melting using different powder grades. Austin, Texas, 2009. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

SPIERINGS ET AL. 2015

Spierings, A. B.; Voegtlin, M.; Bauer, T.; Wegener, K.: Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. Progress in Additive Manufacturing 2015 (2015).

STAHL 1980

Stahl, P. H.: Feuchtigkeit und Trocknen in der pharmazeutischen Technologie: Steinkopff 1980. ISBN: 978-3-7985-0576-6.

STIESS 2009

Stiess, M.: Mechanische Verfahrenstechnik. Partikeltechnologie. 3., vollständig neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009. ISBN: 3540325522. (Springer-Lehrbuch).

STRONDL ET AL. 2015

Strondl, A.; Lyckfeldt, O.; Brodin, H.; Ackelid, U.: Characterization and Control of Powder Properties for Additive Manufacturing. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) 2015 (2015) Volume 67, Issue 3, S. 549-554.

SUTTON ET AL. 2017

Sutton, A.; Kriewall, C.; Leu, M.; Newkirk, J.: Characterization of Heat-Affected Powder Generated during the Selective Laser Melting of 304L Stainless Steel Powder, Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, 2017. (Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium).

TAHERI ANDANI ET AL. 2017

Taheri Andani, M.; Dehghani, R.; Karamooz-Ravari, M. R.; Mirzaeifar, R.; Ni, J.: Spatter formation in selective laser melting process using multi-laser technology. Materials & Design 131 (2017), S. 460-469.

TAHERI ANDANI ET AL. 2018

Taheri Andani, M.; Dehghani, R.; Karamooz-Ravari, M. R.; Mirzaeifar, R.; Ni, J.: A study on the effect of energy input on spatter particles creation during selective laser melting process. Additive Manufacturing 20 (2018), S. 33-43.

---

TRAPP ET AL. 2017

Trapp, J.; Rubenchik, A. M.; Guss, G.; Matthews, M. J.: In situ absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Applied Materials Today* 9 (2017), S. 341-349.

VDI-RICHTLINIE 3405

Verein Deutscher Ingenieure e. V. 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen: 12.2014.

VDI-RICHTLINIE 3633 BLATT 1

Verein Deutscher Ingenieure e. V. 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe: 05.2018.

WATERMAN 2017

Waterman, P.: Metal 3D Printing on the Desktop Heats Up.

<<https://www.digitalengineering247.com/article/3diligent-talks-desktop-metal-and-3d-printing/>> - Zuletzt besucht am 05.01.2019.

WEINGARTEN ET AL. 2015

Weingarten, C.; D. Buchbinder; Pircha, N.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe, R.: Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology* (2015) 221, S. 112-120.

WIEDEMANN 2018

Wiedemann, P.: Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen – Modellierung des Änderungsverhaltens bezüglich Sauerstoffgehalt und Korngrößenverteilung. Masterarbeit, Technische Universität München, 2018.

WOHLERS 2018

Wohlers, T.: Wohlers Report. 3d printing and additive manufacturing state of the industry. Fort Collins: Wohlers Associates 2018. ISBN: 9780991333240.

YABLOKOVA ET AL. 2015

Yablokova, G.; Speirs, M.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.; Schrooten, J.; Cloots, R.; Boschini, F.; Lumay, G.; Luyten, J.: Rheological behavior of  $\beta$ -Ti and NiTi powders produced by atomization for SLM production of open porous orthopedic implants. *Powder Technology* 283 (2015), S. 199-209.

YADOLLAHI ET AL. 2017

Yadollahi, A.; Shamsaei, N.; Thompson, S. M.; Elwany, A.; Bian, L.: Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *International Journal of Fatigue* 94 (2017), S. 218-235.

YANG & EVANS 2007

Yang, S.; Evans, J.R.G.: Metering and dispensing of powder; the quest for new solid freeforming techniques. *Powder Technology* 178 (2007) 1, S. 56-72.

YAN & YU 2015

Yan, M.; Yu, P.: An Overview of Densification, Microstructure and Mechanical Property of Additively Manufactured Ti-6Al-4V - Comparison among Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition and Selective Laser Sintering, and with Conventional Powder. In: Lakshmanan, A. (Hrsg.): *Sintering Techniques of Materials: InTech 2015*. ISBN: 978-953-51-2033-9.

ZÄH & HAGEMANN 2006

Zäh, M.; Hagemann, F.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München: Hanser 2006. ISBN: 3446228543.

ZÜHLKE ET AL. 2017

Zühlke, C.; Molnar, I.; Papplewski, P.: *Test Methods for Additive Manufacturing (AM)*, Werkstoffwoche. Dresden, 2017.

---

# Anhang

## A1 Messmethoden

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Messmethoden erläutert. Die Partikelgrößenverteilung wird mittels Laserbeugung gemäß den Angaben in Tabelle 15 durchgeführt.

*Tabelle 15: Details zur Messmethode Laserbeugung*

Eigenschaft	Beschreibung
<b>Messgerät</b>	HELOS/BR Laserbeugungssensor, Firma Sympatec (Clausthal-Zellerfeld, Deutschland)
<b>Verwendete Einstellungen</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Trockene Dispergierung mittels VIBRI 45 der Firma Sympatec (Clausthal-Zellerfeld, Deutschland)</li><li>▪ Mindestens 10<sup>6</sup> analysierte Partikel pro Messung</li></ul>
<b>Messgenauigkeit</b>	Standardabweichung allgemein unter 1 % (ISO 14488)
<b>Standards</b>	DIN EN 13320; ASTM B822

Für geringe Probenmengen (< 1 cm<sup>3</sup>) wird die Partikelgrößenverteilung mittels REM-Partikelgrößenanalyse bestimmt. Die Probenpräparation erfolgt durch Dispergierung in einer Druckluftströmung mithilfe einer entsprechenden Vorrichtung. Tabelle 16 beinhaltet die weiteren Angaben zu dieser Messmethode.

*Tabelle 16: Details zur Messmethode REM-Partikelgrößenanalyse*

Eigenschaft	Beschreibung
<b>Messgerät</b>	TM3030plus Tabletop Mikroskop, Firma Hitachi Europe (Düsseldorf, Deutschland)
<b>Verwendete Einstellungen</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Automatisierte Bildauswertung: Scandium, Firma Olympus (Münster, Deutschland)</li><li>▪ Probenpräparation: Dispergieren auf selbstklebendem Kohlenstoff-Pad</li><li>▪ Mindestens 2.500 analysierte Partikel pro Messung</li><li>▪ Probenmenge: max. 0,02 g bei AlSi10Mg, max. 0,05 g bei Ti6Al4V; max. 0,03 g bei Edelstahl 1.4404</li></ul>
<b>Messgenauigkeit</b>	1-Sigma-Standardabweichung der charakteristischen Quantile <ul style="list-style-type: none"><li>▪ d<sub>10</sub>-Durchmesser max. ± 1 µm</li><li>▪ d<sub>50</sub>-Durchmesser max. ± 2,3 µm</li><li>▪ d<sub>90</sub>-Durchmesser max. ± 2,8 µm</li></ul>

Alle REM-Aufnahmen in dieser Arbeit wurden mit dem in Tabelle 16 beschrieben Gerät aufgenommen. Die Bauteildichte wurde mittels Archimedisches Prinzip und der in Tabelle 17 aufgeführten Messmethode ermittelt.

*Tabelle 17: Details zur Messmethode Archimedische Dichtemessung*

Eigenschaft	Beschreibung
<b>Messgerät</b>	Laborwaage PLJ-G, Firma KERN & SOHN (Balingen, Deutschland)
<b>Verwendete Einstellungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medien: Luft und Isopropanol bei Raumtemperatur</li> <li>▪ Drei Messungen pro Probe und Medium</li> </ul>
<b>Standard</b>	ISO 3369

Die Ergebnisse wurden zusätzlich anhand von Schliffbildern überprüft. Tabelle 18 beschreibt die Messmethode zur Prüfung der Dauerfestigkeit. Ergänzende Informationen sind in Abbildung 64 angegeben.

*Tabelle 18: Details zur Prüfung der dynamischen Werkstoffeigenschaften*

Eigenschaft	Beschreibung
<b>Messgerät</b>	Instron 8801, Firma Instron (Darmstadt, Deutschland)
<b>Verwendete Einstellungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dehnungsanalyse mittels Videoextensometer</li> <li>▪ Messung bei Raumtemperatur</li> <li>▪ Messfrequenz: 100 Hz (keine Erwärmung der Probe festgestellt)</li> </ul>
<b>Messgenauigkeit</b>	Maximal $\pm 0,5$ % des Anzeigewerts
<b>Standard</b>	ASTM E466-15

Die Messmethode für die Ermittlung der statischen Festigkeitswerte in Abschnitt 6.5.1 wird in Tabelle 19 zusammengefasst.

*Tabelle 19: Details zur Prüfung der statischen Werkstoffeigenschaften*

Eigenschaft	Beschreibung
<b>Messgerät</b>	Zwick Z050, Firma Zwick (Ulm, Deutschland)
<b>Verwendete Einstellungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dehnungsanalyse mittels Videoextensometer</li> <li>▪ Messung bei Raumtemperatur</li> </ul>
<b>Standard</b>	DIN EN ISO 6892-1



Die Heißgasextraktion wird mit dem Gerät Galileo G8 der Firma Bruker (Karlsruhe, Deutschland) durchgeführt. Die Einwaage wird mit einer Präzisionswaage ME104 der Firma Mettler-Toledo (Gießen, Deutschland) bestimmt. Die Einstellungen für die Kombinationen aus zu messenden Elementen (O, N, H) und den Referenzwerkstoffen sind in den Tabellen 20 und 21 aufgeführt. Die Messgenauigkeit laut Hersteller beträgt 5 % und 10 %.

*Tabelle 20: Details zur Bestimmung des Wasserstoffgehalts mittels Heißgasextraktion*

Eigenschaft	AlSi10Mg	1.4404	Ti6Al4V
<b>Standard für Kalibrierung</b>	Titan Leco 502-876		
<b>Leistung</b>	50%		45-50%
<b>Temperatur</b>	ca. 1.800 °C		ca. 1.500 bis 1.800 °C
<b>Analysezeit</b>	120 s		120 s
<b>Probenmasse</b>	50 ± 5 mg	17 ± 5 mg	30 ± 5 mg
<b>Zusätze</b>	keine	keine	Zinntablette
<b>Trägergas</b>	Argon		Stickstoff
<b>Sonstiges</b>	Probenpräparation: Zinnkapsel als Probenträger		

Vor der Wasserstoffmessung mittels Heißgasextraktion werden die Pulverproben durch Lagerung mit einem Trocknungsmittel in einem Probenbehälter bei 0 % relativer Feuchte getrocknet, um adsorbierte Feuchte zu entfernen, welche die Messung beeinflussen könnte.

*Tabelle 21: Details zur Bestimmung des Sauerstoff- und Stickstoffgehalts mittels Heißgasextraktion*

Eigenschaft	AlSi10Mg	1.4404	Ti6Al4V
<b>Standard für Kalibrierung</b>	Titan Leco 502-876; AR670 Alpha	AR 670 Alpha	Titan Leco 502-876
<b>Leistung</b>	50%	80-85 %	85-90%
<b>Temperatur</b>	ca. 1.800 °C	2.200-2.300 °C	ca. 2.300-2.400 °C
<b>Analysezeit</b>	40 s	40 s	40 s
<b>Probenmasse</b>	50 ± 5 mg	17 ± 5 mg	30 ± 5 mg
<b>Zusätze</b>	keine	Nickeltablette	Graphitpulver, Nickeltablette (1:10)
<b>Trägergas</b>	Helium	Helium	Helium
<b>Sonstiges</b>	Zinnkapsel	Nickelkapsel	Nickelkapsel

## A2 Prozessparameter

In den Kapiteln 4, 5 und 6 wurden experimentelle Untersuchungen unter Verwendung der Laserstrahlschmelzanlage SLM125HL (Firma SLM Solutions, Lübeck, Deutschland) durchgeführt. Die verwendeten Prozessparameter orientieren sich eng an der Vorgabe des Herstellers. Die detaillierten Einstellungen für die drei verarbeiteten Werkstoffe sind in Tabelle 22 aufgeführt. Für die Datenvorbereitung wurde der SLM *Build Processor* Version 2.1 genutzt.

Tabelle 22: Verwendete Prozessparameter für die Verarbeitung der Referenzwerkstoffe auf der LBM-Anlage SLM125HL

Bereich	Parameter	AlSi10Mg	Ti6Al4V	1.4404
<b>Belichtung Innenbereich</b>	Laserleistung	300 W	270 W	175 W
	Belichtungs- geschwindigkeit	1.150 mm/s	805 mm/s	550 mm/s
	Spurabstand	170 µm	120 µm	120 µm
	Belichtungsstrategie	Streifen (10 mm Breite)	Schach- brett	Streifen (10 mm Breite)
<b>Belichtung Randkontur</b>	Laserleistung	300 W	100 W	100 W
	Belichtungs- geschwindigkeit	1.200 mm/s	350 mm/s	440 mm/s
	Spurabstand	170 µm	90 µm	80 µm
<b>Laserfokus</b>	Fokusradius	70 µm		
<b>Vorheizung</b>	Vorheiztemperatur	200 °C		
<b>Beschichtung</b>	Schichtdicke	50 µm		
<b>Atmosphäre</b>	Schutzgas	Argon		
	Schutzgasstrom	5,4 – 5,8 m/s		
	Sauerstoffgehalt	max. 0,2 %		

Der Beschichter wird von oben mit Pulver befüllt, für den Schichtauftrag wird eine Doppellippe aus Gummi genutzt. Es wird eine Pulverzustellmenge bezogen auf die Bauhöhe von 50 cm<sup>3</sup>/mm verwendet. Die Strömungsgeschwindigkeit des Schutzgasstroms wird vor dem Einlass in den Bauraum gemessen.

### A3 Baujobgeometrie zur Untersuchung von Änderungseffekten für runde Bauflächen

In Unterkapitel 4.2.1.1 wird die Anordnung der Probenkörper und Entnahmebereiche für quadratische Bauplatten dargestellt. Ergänzend ist Abbildung 21 die Variante für runde Bauplatten zu entnehmen.

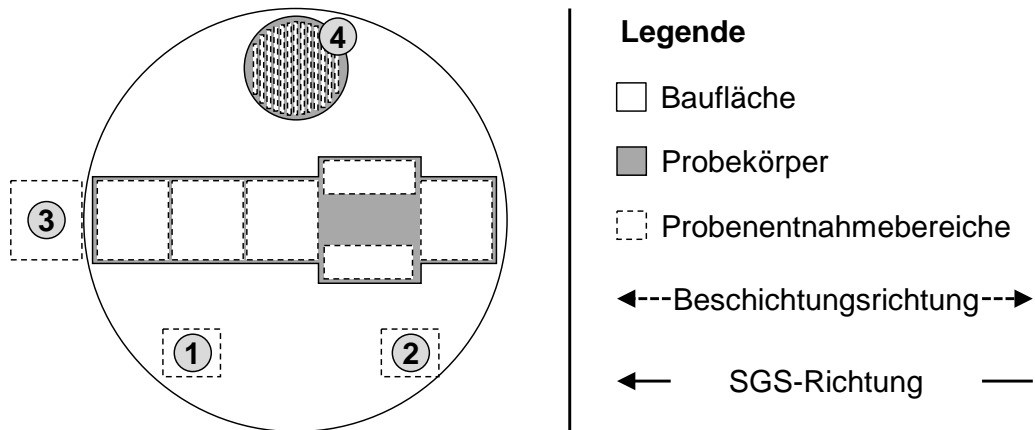


Abbildung 72: Schematischer Aufbau des Baujobs zur Untersuchung der Effekte im LBM-Prozess für runde Bauplatten

Im Vergleich zu der Konfiguration in Abbildung 21 sind der Schutzgasstrom und die Beschichtungsrichtung in die gleiche Raumrichtung orientiert.

### A4 Einfluss von Trockenmittel in Lagerbehältern

Durch die Hinzugabe eines Trocknungsmittels in den Lagerbehälter des Pulvers kann die relative Feuchtigkeit im Behälter auf einen Wert nahe 0 % reduziert werden. Abbildung 73 zeigt den Verlauf des Klimas in einem Behälter, in dem AlSi10Mg-Pulver zusammen mit einem Trocknungsmittel (50 g Kieselgel als Beutel) gelagert wird. Die Daten wurden mit einem Klimaloggers Typ LOG 32 TH aufgenommen.

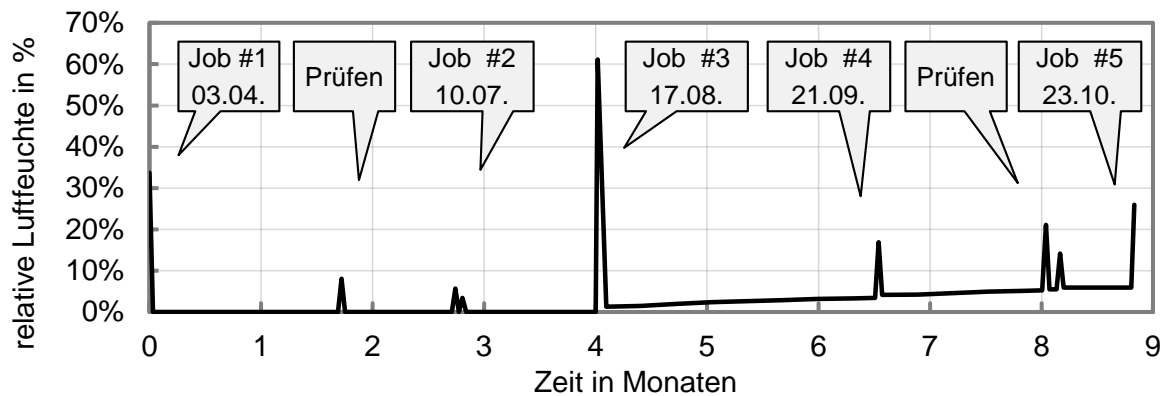


Abbildung 73: Verlauf der relativen Feuchtigkeit in einem Lagerbehälter für Pulvermaterial mit beigelegten Trocknungsmittel

Über den Verlauf der Messung wurde der Behälter mehrfach geöffnet. Es wurde jeweils Pulver für einen Baujob oder eine Pulverprobe zur Charakterisierung der Pulvercharge entnommen. Nach der Öffnung, bei der Umgebungsatmosphäre in den Behälter eindringt, fällt die relative Feuchtigkeit schnell wieder auf einen Wert nahe 0 %. Es zeigt sich, dass sich nach der langen Öffnung des Behälters nach 4 Monaten eine leichte kontinuierliche Zunahme der relativen Feuchtigkeit einstellt. Der Verlauf deutet darauf hin, dass das Trocknungsmittel nach diesem Zeitpunkt anfängt seine Wirkung zu verlieren.

## A5 Flussdiagramm: Berechnungsansatz für die Einbringung von Spritzerunterkorn

Der in Abschnitt 5.4 beschriebene Ansatz zur Berechnung der eingebrachten Masse des Spritzerunterkorns kann alternativ und im Hinblick auf eine softwarebasierte Berechnung auch als Flussdiagramm dargestellt werden (vgl. Abbildung 74). Anhand dieses Ablaufs kann die Einbringung des Spritzerunterkorns in das Pulverbett und den umgebenden Bauraum für jeweils eine Schicht näherungsweise berechnet werden. Dabei werden eine innere und eine äußere Schleife durchlaufen, um sämtliche Kombinationen der Elemente auf der Baufläche und der Elemente des Spritzerprofils anzusprechen. In der inneren Schleife wird geprüft, welcher Teilmenge (Pulverbett oder umgebender Bauraum) das Spritzerunterkorn der jeweiligen Elementkombination zugeordnet wird.

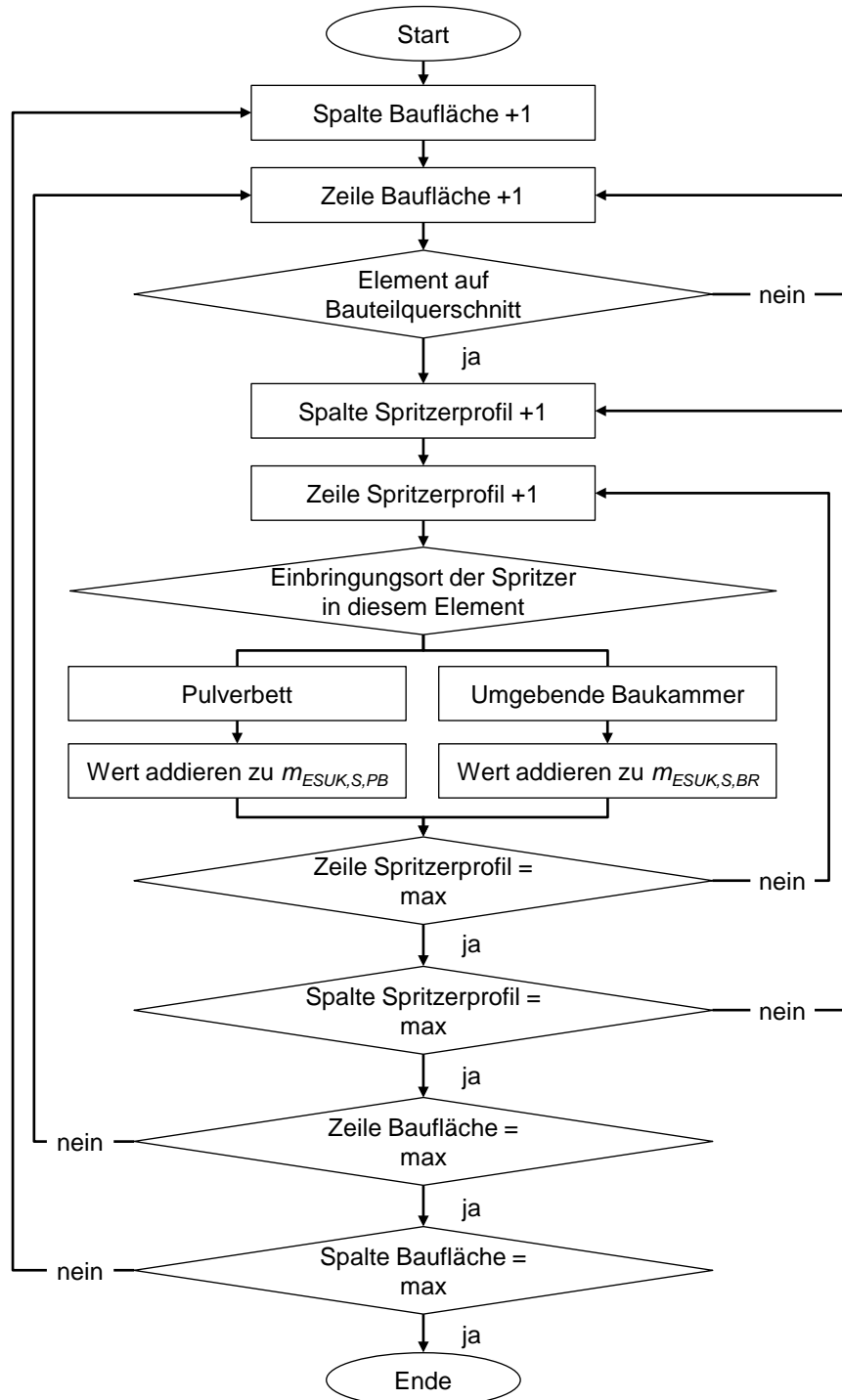


Abbildung 74: Flussdiagramm für die softwarebasierte Berechnung der Einbringung von Prozessspritzern in das Pulverbett und die umgebende Baukammer

## A6 Eingebachte Studienarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstanden am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) sowie nachfolgend in der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in den Jahren 2014 bis 2018 unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die in Tabelle 23 aufgeführten studentischen Arbeiten. Die erarbeiteten Ergebnisse sind teilweise in die vorliegende Arbeit eingeflossen und werden als Literatur aufgeführt.

*Tabelle 23: Studienarbeit, die in der vorliegenden Arbeit zitiert wurden*

Autor	Titel
Korbinian Boisserée	Alterungsverhalten von Metallpulvern aus AlSi10Mg, Ti6Al4V und 1.4404 durch Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen
Marcel Huszar	Entwicklung eines Modells zur Charakterisierung der räumlichen Verteilung von Prozessspritzern beim Laserstrahlschmelzen
Isabelle Paul	<i>Influence of Increased Oxygen due to Spatter Inclusion on the Fatigue Resistance of AlSi10Mg Alloy Fabricated by Selective Laser Melting</i>
Patrik Wiedemann	Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen – Modellierung des Änderungsverhaltens bezüglich Sauerstoffgehalt und Korngrößenverteilung

Die aufgeführten Studienarbeiten bauen auf Vorarbeiten der folgenden Studierenden auf, deren Arbeiten ebenso in diesem Zeitraum betreut wurden (in alphabetischer Reihenfolge): Siegfried Bähr, Marcel Bröker, Maximilian Freitag, Tobias Frunder, Florian Fuß, Christoph Hauck, Stephanie Lizak, Konstantin Madaus, Tim Mayer, Markus Rößler, Felix Schwer, Dominik Viehweger und Benedikt Zöller. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.