

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens

Dipl.-Ing. (Univ.)
Stefan Lutzmann

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt,
Universität Duisburg-Essen

Die Dissertation wurde am 26.08.2010 an der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.12.2010 angenommen.

Stefan Lutzmann

**Beitrag zur Prozessbeherrschung des
Elektronenstrahlschmelzens**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 245

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2010

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2011

ISBN 978-3-8316-4070-6

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

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

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

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, dem Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn, dem Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenelemente der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

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

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie danken, der ich diese Arbeit widme. Dabei möchte ich besonders meiner Mutter, Frau Barbara Lutzmann, und meinem Vater, Herrn Wolfgang Lutzmann, für die großzügige und verständnisvolle Unterstützung während meines gesamten akademischen Werdegangs danken.

Augsburg, im Dezember 2010

Stefan Lutzmann

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	XIII
Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen	XVII
Verzeichnis der griechischen Formelzeichen	XXV
1 Einleitung und Grundlagenbetrachtung	1
1.1 Gegenwärtige Situation produzierender Unternehmen.....	1
1.2 Einführung in die Technologie des Strahlschmelzens	3
1.2.1 Nutzenaspekte durch den Einsatz des Strahlschmelzens.....	3
1.2.2 Funktionsprinzip des Strahlschmelzens.....	5
1.2.3 Begriffsdefinitionen und Verfahrensabgrenzung	6
1.3 Grundlagen des Elektronenstrahlschmelzens.....	7
1.3.1 Einführung in die Elektronenstrahltechnik.....	7
1.3.2 Anlagentechnik für das Elektronenstrahlschmelzen.....	13
1.3.3 Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens.....	14
1.4 Ausgangssituation im Bereich des Elektronenstrahlschmelzens	15
1.4.1 Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens	15
1.4.2 Definition relevanter Fehlerbilder	17
1.4.3 Handlungsbedarf zur Prozessbeherrschung.....	20
1.5 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	21

1.5.1	Zielsetzung	21
1.5.2	Struktur der Arbeit	22
1.5.3	Abgrenzung des Untersuchungsbereichs	25
2	Stand der Erkenntnisse	27
2.1	Allgemeines	27
2.2	Pulververblasen.....	28
2.2.1	Allgemeines	28
2.2.2	Erklärungsansatz	28
2.2.3	Erkenntnisse zur Vermeidung des Pulververblasens	33
2.3	Schmelztropfenbildung.....	35
2.3.1	Allgemeines	35
2.3.2	Erklärungsansatz	35
2.3.3	Erkenntnisse zur Vermeidung der Schmelztropfenbildung	37
2.3.4	Schlussfolgerungen für das Elektronenstrahlschmelzen	38
2.4	Schichtablösung	40
2.4.1	Allgemeines	40
2.4.2	Erklärungsansatz	41
2.4.3	Erkenntnisse zur Vermeidung der Schichtablösung	42
2.4.4	Schlussfolgerungen für das Elektronenstrahlschmelzen	43
2.5	Zusammenfassung	44
3	Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens	45
3.1	Allgemeines und Methodenentwurf	45
3.2	Grundlagen der Modellierung und Simulation	47
3.2.1	Begriffsdefinition	47

3.2.2	Modellierung und Simulation im Problemlösungsprozess	48
3.2.3	Systemtechnische Analyse	50
3.2.4	Einführung in die Finite-Elemente-Methode (FEM).....	52
3.2.5	Temperaturfeldberechnung mit Hilfe der FEM.....	53
3.3	Formalisierung des Systems Elektronenstrahlschmelzen	54
3.3.1	Festlegung der Systemgrenze	54
3.3.2	Eingänge und Ausgänge des Systems Elektronenstrahlschmelzen	55
3.3.3	Strukturierung des realen Systems Elektronenstrahlschmelzen ...	56
3.3.4	Interaktion innerhalb des Systems Elektronenstrahlschmelzen....	57
3.3.5	Erhöhung des Detaillierungsgrads der Betrachtung	58
3.4	Eingänge des Teilsystems Pulverbereiche verfestigen.....	59
3.4.1	Analyse der Eingangsgrößen	59
3.4.2	Auswahl relevanter Parameter.....	63
3.5	Ausgänge des Teilsystems Pulverbereiche verfestigen.....	65
3.5.1	Allgemeines	65
3.5.2	Merkmale eines angestrebten Bauteils	66
3.6	Zusammenfassung und Zwischenfazit	67
4	Analytische Prozessmodellierung.....	69
4.1	Allgemeines.....	69
4.2	Modellierung des Pulververblasens	69
4.2.1	Allgemeines	69
4.2.2	Versuchsbasierte Untersuchung des Pulververblasens.....	70
4.2.3	Zwei-Phasen-Modell des Pulververblasens.....	72
4.2.3.1	Aufladephase	73
4.2.3.2	Entladephase.....	77

4.2.4	Schlussfolgerungen	78
4.3	Modellierung des thermischen Prozesses	81
4.3.1	Allgemeines	81
4.3.2	Prozessphasen des Elektronenstrahlschmelzens	81
4.3.3	Wärmebilanz	83
4.3.4	Wärmeleitungsgleichung für das Elektronenstrahlschmelzen	84
4.3.5	Anfangs- und Randbedingungen.....	85
4.3.6	Wärmequelle Elektronenstrahl.....	87
4.3.7	Effektive Werkstoffkennwerte.....	92
4.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	109
5	Numerische Lösung des thermischen Prozessmodells	111
5.1	Allgemeines	111
5.2	Implementierung des thermischen Prozessmodells	111
5.2.1	Idealisierung der realen Aufgabenstellung	111
5.2.2	Erstellung des Simulationsmodells	112
5.2.3	Lösung des Simulationsmodells.....	116
5.3	Validierung des Simulationsmodells	121
5.3.1	Allgemeines	121
5.3.2	Auswertung der Messergebnisse.....	122
5.3.3	Kalibrierung des Simulationsmodells	124
5.4	Anwendung des Simulationsmodells zur Vermeidung von Schmelztropfenbildung und Schichtablösung	128
5.4.1	Allgemeines	128
5.4.2	Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB}	130
5.4.3	Kontaktbreite des Schmelzbades B_K	130

5.4.4	Einschmelztiefe T_E	131
5.5	Zusammenfassung und Zwischenfazit	133
6	Umsetzung der Modellierung und Wirtschaftlichkeitsabschätzung	135
6.1	Vorgehensweise im Kapitel	135
6.2	Eliminierung des Pulververblasens	135
6.2.1	Versuchskonzept.....	135
6.2.2	V Versuchsergebnisse	137
6.3	Eliminierung von Schmelztropfenbildung und Schichtablösung.....	140
6.3.1	Vorversuche.....	140
6.3.2	Vergleich der Vorversuche mit Simulationsergebnissen.....	141
6.3.3	Prozessparameterfenster für das Elektronenstrahlschmelzen.....	143
6.3.4	Herstellung von Probekörpern.....	145
6.4	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit.....	147
6.4.1	Vorgehen	147
6.4.2	Annahmen für die Kostenrechnung.....	148
6.4.3	Bewertung der technologischen Weiterentwicklung.....	149
6.4.4	Bewertung im Vergleich zum Laserstrahlschmelzen	152
7	Schlussbetrachtung.....	157
7.1	Zusammenfassung.....	157
7.2	Ausblick	158
	Literaturverzeichnis.....	161
	Anhang	175

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veränderung der industriellen Nettoproduktion ausgewählter Wirtschaftszweige in Deutschland in Bezug auf das Jahr 1991 (GEHRKE et al. 2008)	2
Abbildung 2: Mittels Strahlschmelzverfahren hergestellte Beispielbauteile aus ausgewählten Branchen	4
Abbildung 3: Funktionsprinzip des Strahlschmelzens in Anlehnung an MEINDL (2005)	5
Abbildung 4: Aufbau des Strahlerzeugerraums eines Triodensystems in Anlehnung an SCHULTZ (2000)	8
Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Elektronenstrahlkanone	9
Abbildung 6: Elementarprozesse am Strahlauftreffort in Anlehnung an WIESNER (1989)	12
Abbildung 7: Schematischer Aufbau des verwendeten Demonstrators für das Elektronenstrahlschmelzen	14
Abbildung 8: Verfahrensablauf des Elektronenstrahlschmelzens	15
Abbildung 9: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Fehlerbildes Pulververblasen nach SIGL et al. (2006)	18
Abbildung 10: Verschiedene Ausprägungen des Fehlerbildes Schmelztropfenbildung beim Elektronenstrahlschmelzen von Edelstahl 1.4404	19
Abbildung 11: Fehlerbild Schichtablösung in verschiedenen Bereichen eines Bauteils	20
Abbildung 12: Definition und Zusammenhang von Prozessfähigkeit und Prozessbeherrschung für Produktionsprozesse in Anlehnung an EICHGRÜN (2003)	21
Abbildung 13: Struktur der Arbeit	23
Abbildung 14: Füllung von Bauteilquerschnitten mit quadratischen (links) und kreisförmigen (rechts) Grundmustern	25
Abbildung 15: Bewertung der Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Vermeidung des Pulververblasens (SIGL et al. 2006)	33
Abbildung 16: Ausgewählte Pulverpartikelformen: kugelig (links) und spratzig (rechts)	34

Abbildung 17: Abhängigkeit des Benetzungsverhaltens vom Kontaktwinkel Θ zwischen Flüssigkeit L und fester Oberfläche O nach YOUNG (1805)...	35
Abbildung 18: Kriterium für die Instabilität des Schmelzbades (KRUTH et al. 2004)....	36
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der Ablösung von Schmelztropfen und der Breite der metallurgischen Anbindung an eine darunterliegende verfestigte Schicht beim Laserstrahlschmelzen nach GUSAROV et al. (2007)	37
Abbildung 20: Prozessfenster für das Laserstrahlschmelzen (KRUTH et al. 2004).....	38
Abbildung 21: Entstehung von Eigenspannungen aufgrund des Temperature Gradient Mechanism (TGM) nach MERCELIS & KRUTH (2005)	42
Abbildung 22: Verbesserung der Schichtverbindung in Abhängigkeit der Orientierung der Scanvektoren nach KAHNERT et al. (2007).....	43
Abbildung 23: Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens und Zuordnung der Bestandteile zu den Abschnitten der Arbeit.....	45
Abbildung 24: Zusammenwirken von Realität, Modell und Simulation (SCHILLER 2007)	48
Abbildung 25: Zusammenhänge und Begriffe der Systemtechnik nach PAHL et al. (2007)	50
Abbildung 26: Abgrenzung des betrachteten Systems Elektronenstrahlschmelzen von seiner Umgebung	55
Abbildung 27: Funktionsstruktur des Systems Elektronenstrahlschmelzen (oben) sowie des Teilsystems Pulverbereiche verfestigen (unten)	58
Abbildung 28: Untergliederung der Teilsystemeingänge im Bereich Elektronenstrahl.	60
Abbildung 29: Untergliederung der Teilsystemeingänge im Bereich vorgeheizte Pulverschicht.....	61
Abbildung 30: Untergliederung der Teilsystemeingänge im Bereich Scanstrategie	62
Abbildung 31: Messung des Targetstroms und zeitliche Zuordnung der Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera während des Pulververblasens.....	71
Abbildung 32: Zeitliche Einteilung des Pulververblasens in zwei Phasen	72
Abbildung 33: Ersatzschaltbild für das System Elektronenstrahl-Pulver-Grundplatte während des Aufladevorgangs.....	73

Abbildung 34: Quadratisches Grundmuster zur Pulververfestigung (Draufsicht)	82
Abbildung 35: Schema der Prozesszone mit Bilanzhülle.....	82
Abbildung 36: Bilanzhülle mit thermisch relevanten Größen für das Elektronenstrahlschmelzen (G_{\dots} = Grenzfläche)	83
Abbildung 37: Horizontale Intensitätsverteilung der Leistung des Elektronenstrahls $I_h(x,y)$ für $\sigma_B = 4,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	89
Abbildung 38: Verlauf der spezifischen Wärmekapazität des Pulverwerkstoffs 1.4404 über der Temperatur (GRIGORIEV & MEILIKHOV 1996; VDI-WÄRMEATLAS 2002; BANERJEE et al. 2007).....	94
Abbildung 39: Kombiniertes Wärmeleitungsmodell für metallische Pulverwerkstoffe in Anlehnung an WAGNER (2003).....	95
Abbildung 40: Geometriemodell der Einheitszelle zur Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit einer Pulverschüttung vor dem Aufschmelzen nach ZEHNER & SCHLÜNDER (1970); BAUER & SCHLÜNDER (1978)	97
Abbildung 41: Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Pulversystems aus 1.4404 vor dem Aufschmelzen.....	100
Abbildung 42: Modellvorstellung zum Übergang der Pulvergeometrie zu flüssigem Material nach SUN (1991)	101
Abbildung 43: Geometrieänderung eines sinternden Pulverpartikels nach SUN (1991).....	102
Abbildung 44: Wärmeleitung in der Kontaktfläche zweier benachbarter Partikel A_K . 103	
Abbildung 45: Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Pulverwerkstoff 1.4404 nach dem kombinierten Wärmeleitungsmodell.....	105
Abbildung 46: Verlauf der relativen Dichte des Pulverwerkstoffs 1.4404	106
Abbildung 47: Verlauf des effektiven Emissionskoeffizienten von Pulverwerkstoff 1.4404 und von kompaktem Feststoff 1.4404 sowie Vergleich mit Experimenten nach SIH & BARLOW (1995).....	108
Abbildung 48: Freischneiden einer für das Elektronenstrahlschmelzen repräsentativen FEM-Geometrie	111
Abbildung 49: Grundmaße und innere Zustände des FEM-Geometriemodells.....	113

Abbildung 50: Randbedingungen für das FEM-Geometriemodell.....	114
Abbildung 51: Vernetzung des FEM-Geometriemodells	115
Abbildung 52: Lage des Scanvektors in Bezug auf das FEM-Geometriemodell	117
Abbildung 53: Aufbau zur Temperaturerfassung (links: Grundplatte mit Thermoelement; rechts: relevanter Ausschnitt der Einbausituation)....	122
Abbildung 54: Verläufe der gemessenen Temperaturen	124
Abbildung 55: Geometrie (links) und Vernetzung (rechts) des um das Thermoelement erweiterten Simulationsmodells für die Kalibrierung	125
Abbildung 56: Vergleich von gemessenen Temperaturen und Simulationsergebnissen	127
Abbildung 57: Ableitung von Kennwerten aus den Simulationsergebnissen.....	129
Abbildung 58: Berechnetes Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB}	130
Abbildung 59: Berechnete Kontaktbreite des Schmelzbades B_K bei $z = -0,1 \text{ mm}$	131
Abbildung 60: Berechnete Einschmelztiefe T_E in vertikaler Richtung, ausgehend von der Pulverschichtoberseite	132
Abbildung 61: Ergebnisse der Vorversuche mit einer Pulverschicht	141
Abbildung 62: Prozessparameterfenster für das Elektronenstrahlschmelzen	143
Abbildung 63: Vorbereitung des Probekörpers zur mikroskopischen Analyse.....	145
Abbildung 64: Mikroskopaufnahmen des Prüflings bei einfacher Vergrößerung	146
Abbildung 65: Mittels Elektronenstrahlschmelzen hergestellte Strukturgeometrien ...	147
Abbildung 66: Versuchsbauteil Hohlzylinder nach SIGL (2008).....	149
Abbildung 67: Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens nach SIGL (2008)	150
Abbildung 68: In der Arbeit entwickelter Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens	151
Abbildung 69: 3D-CAD-Ansicht des Misch- und Schereinsatzes für Spritzgießwerkzeuge.....	153
Abbildung 70: Gegenüberstellung der Gesamtkosten für die Herstellung des Misch- und Schereinsatzes mittels Strahlschmelzen	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahlmatrix für das Teilsystem Pulverbereiche verfestigen.....	64
Tabelle 2:	Analyse der Kraft- bzw. Druckwirkungen und der ursächlichen Basisgrößen	78
Tabelle 3:	Zusammenhang zwischen relevanten Basisgrößen und Eingangsgrößen...	79
Tabelle 4:	Primäre und sekundäre Einflussgrößen auf die effektive Wärmeleitfähigkeit von Pulverschüttungen nach VDI-WÄRMEATLAS (2002)	96
Tabelle 5:	Versuchsplan zur Durchführung von Simulationsexperimenten	118
Tabelle 6:	Konstant gehaltene Prozessparameter für die Simulationsversuche.....	119
Tabelle 7:	Zeitschrittsteuerung für die Simulation des thermischen Prozesses beim Elektronenstrahlschmelzen	120
Tabelle 8:	Versuchsplan für die Temperaturmessungen zur Validierung des Simulationsmodells.....	123
Tabelle 9:	Planung und Ergebnisse der Versuche zum Pulververblasen	138
Tabelle 10:	Wertepaare aus P_B und v_s mit berechneten Kontaktbreiten $B_K \geq 0,40$ mm.....	142
Tabelle 11:	Kostensätze für das Elektronenstrahlschmelzen nach ZÄH (2006).....	148
Tabelle 12:	Gegenüberstellung der Herstellkosten des Hohlzylinders mittels Elektronenstrahlschmelzen nach SIGL (2008) mit den Herstellkosten nach aktuellem Stand	152
Tabelle 13:	Kostensätze und Annahmen für das Laserstrahlschmelzen nach ZÄH (2006).....	154

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
A	Ampere
a	annus (Jahr)
AB	Aktiebolag (schwedisch für Aktiengesellschaft)
AG	Aktiengesellschaft
al.	alii (andere)
ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian (numerische Lösungsmethode, welche Formulierungen von Lagrange und Euler verbindet)
bar	báros (Druck)
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
C	Coulomb
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design (computergestützte Konstruktion)
CAX	Computer Aided x (computergestützter Produktentstehungsprozess, wobei der Platzhalter „x“ für verschiedene Schritte dieses Prozesses steht)
cm	Zentimeter
Co.	Compagnie
d. h.	das heißt
DGL	Differentialgleichung
DIN	Deutsches Institut für Normung
div	Diverenz (mathematischer Differentialoperator)
DMLS	Direktes Metall-Lasersintern (Markenbezeichnung)
€	Euro
EB	Electron Beam (Elektronenstrahl)

EBM	Electron Beam Melting (Elektronenstrahlschmelzen)
EBS	Electron Beam Sintering (Elektronenstrahlsintern)
engl.	englisch
et	und
etc.	et cetera (und so weiter)
exp()	Exponentialfunktion mit der Eulerschen Zahl e als Basis
F	Force (Kraft)
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
G	Grenzfläche
g	Gramm
Gl.	Gleichung
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GP	Grundplatte
grad	Gradient (mathematischer Differentialoperator)
h	hora (Stunde)
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel
IMLS	Indirektes Metall-Lasersintern
IuK	Information und Kommunikation
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München
J	Joule
K	Kelvin
k	kilo (tausend)
KGaA	Kommanditgesellschaft auf Aktien

kg	Kilogramm
konst.	konstant
kW	Kilowatt
L	Flüssigkeit
m	Meter
mbar	Millibar
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarden
N	Newton
O	Oberfläche
o. g.	oben genannt
Ω	Ohm
PC	Personal Computer (Einzelplatzrechner)
%	Prozent
s	Sekunde
s. o.	siehe oben
sinngem.	sinngemäß
SLM	Selective Laser Melting (Markenbezeichnung)
sog.	sogenannt
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STL	Standard Triangulation Language (Industriestandard zur virtuellen Geometriedarstellung)
TGM	Temperature Gradient Mechanism (Temperatur-Gradienten-Mechanismus)
u. a.	unter anderem

u. U.	unter Umständen
UMFPACK	Unsymmetric MultiFrontal PACKAge (unsymmetrische MultiFrontal-Methode)
V	Volt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
vgl.	vergleiche
W	Watt
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Yb	Ytterbium
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis der lateinischen Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
a	m	halber Abstand der Partikelzentren vor dem Sintern
A_B	m^2	Fläche des Strahlaufftreffbereichs
A_i	K	absolute Genauigkeit für den Freiheitsgrad i
A_K	m^2	Fläche eines Strahlung emittierenden Körpers
A_K	m^2	kreisförmige Kontaktfläche
A_{Kugel}	m^2	Oberfläche einer Kugel
A_P	-	Anzahl der bestrahlten Pulverpartikel
A_R	$\text{A}/(\text{m}^2\text{K}^2)$	Richardson-Konstante
$A_{Schmelzbad}$	m^2	Oberfläche des Schmelzbads
$\{B\}$	Vs/m^2	Vektor der magnetischen Flussdichte
B	-	Verformungsparameter
B_F	$\text{€}/\text{m}^2$	Betriebskosten pro Fläche
B_K	m	Kontaktbreite des Schmelzbads
$B_{Schmelzbad}$	m	Schmelzbadbreite
$[C]$	-	Wärmekapazitätsmatrix
C	$\text{m}^2/(\text{Vs})$	Geschwindigkeitsgradient eines Elektrons
c	$\text{J}/(\text{kgK})$	spezifische Wärmekapazität
c_0	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
C_f	-	Formfaktor
$c_{Feststoff}$	$\text{J}/(\text{kgK})$	spezifische Wärmekapazität des Feststoffs
c_{Gas}	$\text{J}/(\text{kgK})$	spezifische Wärmekapazität des Gases
C_K	F	Kapazität einer Kugel
c_p	$\text{J}/(\text{kgK})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck

$C_{P,GP}$	F	Kapazität des Systems <i>Pulver-Grundplatte</i>
c_{Pulver}	J/(kgK)	spezifische Wärmekapazität des Pulvers
c_v	J/(kgK)	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
d_{90}	m	Durchmesser eines Kreises, der 90 % der Strahlleistung beinhaltet
dA	-	infinitesimal kleines Flächenelement
d_B	m	Strahlfleckdurchmesser
d_p	m	Durchmesser eines Pulverpartikels
d_{PV}	m	Durchmesser des Bereichs mit Pulververblasen
$\{E\}$	V/m	Vektor des elektrischen Feldes
e	-	Eulersche Zahl
E_i	K	geschätzter lokaler Fehler bei jedem Berechnungsschritt
E_{kin}	J	kinetische Energie
E_{pot}	J	potenzielle Energie
E_{V_EB}	J/m ³	Volumenenergie für das Elektronenstrahlschmelzen
E_Z	h/a	Arbeitszeit pro Jahr
$\{F_L\}$	N	Vektor der Lorentzkraft
F	N	Kraft
F_A	m ²	Flächenbedarf der Anlage
F_B	N	Elektronenstrahlkraft
F_C	N	Coulombkraft
F_g	-	Korrekturfaktor für die Gasphase
F_p	-	Korrekturfaktor für die feste Phase
g	m/s ²	Erdbeschleunigung, Ortsfaktor
H	A/m	magnetische Feldstärke

h	m	Hatch-Abstand
h_K	m	Abstand zwischen Pulverschicht und Kammerdecke
I	A	Strom
$I_h(x,y)$	1/m ²	horizontale Intensitätsverteilung der Wärmequelle
$I(x,y,z)$	1/m ³	räumliche Intensitätsverteilung der Wärmequelle
$I_v(z)$	1/m	vertikale Intensitätsverteilung der Wärmequelle
i	-	Laufvariable
I_B	A	Strahlstrom
$I_{B,eff}$	A	effektiver Strahlstrom
I_C	A	Strom an der Kapazität
I_k	A	kritischer Strahlstrom
I_{KS}	%	Instandhaltungskostensatz
I_L	A	Linsenstrom
I_R	A	Strom am Widerstand
I_{Target}	A	Strom am Erdungskabel
j	-	Laufvariable
$[k]$	-	Leitfähigkeitsmatrix
K_A	€	Summe der Kosten für Vor- und Nachbereitung der Anlage
K_{AS}	€/h	Abschreibungskosten
k_B	J/K	Boltzmann-Konstante
K_{BM}	€	Maschinenkosten
K_E	€/h	Energiekosten pro Stunde
K_G	€/m ³	Schutzgaspreis
K_{ges}	€	Gesamtkosten zur generativen Bauteilherstellung
K_I	€/h	Instandhaltungskosten

K_{M1}	€/h	Stundensatz für Mitarbeiter 1
K_{M2}	€/h	Stundensatz für Mitarbeiter 2
K_{MH}	€/h	Maschinenstundensatz
K_{MK}	€	Materialkosten
K_{NB}	€	Nachbearbeitungskosten
K_P	€/kg	Pulverkosten pro Kilogramm
K_R	€/h	Raumkosten pro Stunde
K_{SG}	€/h	Schutzgaskosten
K_{SK}	€/(kWh)	Strompreis
K_W	1/m	Skalierungsfaktor
K_Z	€/h	kalkulatorische Zinskosten
L	V ² /K ²	Lorenz-Zahl
l	m	mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle
L_{Modell}	m	Modelllänge
$L_{Schmelzbad}$	m	Schmelzbadlänge
m	kg	Masse
m_0	kg	Ruhemasse eines Elektrons
$m_{Feststoff}$	kg	Masse des Feststoffs
$m_{Flüssigkeit}$	kg	Masse der vom Messkörper verdrängten Flüssigkeit
m_{Gas}	kg	Masse des Gases
m_{ges}	kg	Gesamtmasse
$m_{Messkörper}$	kg	Masse des Messkörpers
$\{n\}$	-	Normalenvektor
N	-	Anzahl der zu lösenden Freiheitsgrade
n	-	Ordnung der Matrix (n,n)
N_D	a	Nutzungsdauer

n_e	-	Anzahl der Elektronen pro Volumeneinheit
N_F	%	Nutzungsfaktor
N_H	-	Hilfsgröße
n_P	-	Anzahl der Partikel im Pulverbett
p	N/m ²	Druck
P_{90}	W	anteilige Strahlleistung
p_A	W/m ³	absorbierte Leistung je Volumeneinheit
p_{Amax}	W/m ³	maximal absorbierte Leistung je Volumeneinheit
P_B	W	Elektronenstrahlleistung
p_B	N/m ²	Elektronenstrahldruck
p_e	Ns	Impuls eines Elektrons
p_{EB}	Ns	Impuls des Elektronenstrahls
P_G	-	Gasphase
P_L	W	Laserstrahlleistung
P_N	kW	Nennleistung
$\{Q\}$	J	Vektor mit Wärmelasten
\dot{Q}	W	Wärmestrom
Q	J	Wärme
\dot{q}	W/m ²	spezifischer Wärmestrom
q	C	Elementarladung
Q_C	C	Ladung des Kondensators
Q_K	C	Ladung einer Kugel
Q_P	C	elektrische Ladung eines Pulverpartikels
R	m	Radius
r	m	Radius
R_A	m	Außenradius des Leiters

R_a	m	arithmetischer Mittenrauhwert
r_a	m	Anfangsradius des als Kugel modellierten Partikels
$r_{B,i}$	m	Abstand zwischen dem betrachteten Partikel und der Strahlachse
R_{GP}	Ω	elektrischer Widerstand der Grundplatte
$r_{GP,i}$	m	Abstand zwischen dem betrachteten Partikel und dem Zentrum der Grundplatte
$r_{i,j}$	m	Abstand zwischen zwei exemplarischen Pulverpartikeln i und j
r_K	m	Radius einer Kugel
r_P	m	Radius eines Partikels
$R_{P,GP}$	Ω	elektrischer Widerstand des Systems <i>Pulver-Grundplatte</i>
R_{rel}	%	relative Genauigkeit
R_{WL}	K/W	Wärmeleitwiderstand
S	m	Eindringtiefe
S_v	-	Skalierungsfaktor
$\{T\}$	$^{\circ}\text{C}$	Vektor mit Knotentemperaturen
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
t	s	Zeit
T_0	$^{\circ}\text{C}$	Pulveranfangstemperatur
T_E	m	Einschmelztiefe
T_K	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur eines Strahlung emittierenden Körpers
$T_{Liquidus}$	$^{\circ}\text{C}$	Liquidustemperatur
T_M	$^{\circ}\text{C}$	Mittentemperatur von δ
t_S	m	Pulverschichthöhe
t_{Sim}	s	Simulationszeit

$T_{Solidus}$	°C	Solidustemperatur
T_U	°C	Umgebungstemperatur
T_V	°C	Vorheiztemperatur des Pulvers
$T_{vs100max}$	°C	maximale Temperatur bei $v_s = 100$ mm/s
$T_{vs200max}$	°C	maximale Temperatur bei $v_s = 200$ mm/s
$T_{vs25max}$	°C	maximale Temperatur bei $v_s = 25$ mm/s
$T_{vs50max}$	°C	maximale Temperatur bei $v_s = 50$ mm/s
$t_{vs100max}$	s	Zeitpunkt der maximalen Temperatur bei $v_s = 100$ mm/s
$t_{vs200max}$	s	Zeitpunkt der maximalen Temperatur bei $v_s = 200$ mm/s
$t_{vs25max}$	s	Zeitpunkt der maximalen Temperatur bei $v_s = 25$ mm/s
$t_{vs50max}$	s	Zeitpunkt der maximalen Temperatur bei $v_s = 50$ mm/s
U	V	Spannung
U_A	V	Beschleunigungsspannung
U_C	V	Spannung an der Kapazität
$\{v_P\}$	m/s	Geschwindigkeitsvektor des betrachteten Partikels
V	m ³	Volumen
v	m/s	Geschwindigkeit
V_A	%	Verfügbarkeit der Anlage
v_E	m ³	Volumen des Strahleindringbereichs
v_e	m/s	relativistische Elektronengeschwindigkeit
V_G	m ³ /h	durchschnittlicher Schutzgasverbrauch pro Stunde
V_{Kugel}	m ³	Volumen einer Kugel
V_{LB}	-	Quotient aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite

V_{mess}	m ³	gemessenes Volumen
$V_{Schmelzbad}$	m ³	Volumen des Schmelzbads
v_s	m/s	Scangeschwindigkeit
\dot{W}	W/m ³	Wärmequelle
W	J	mechanische Arbeit
W_{WB}	€	Wiederbeschaffungswert
\dot{W}_s	W	Wärmestrom durch Strahlung
x	-	Koordinatenachse
y	-	Koordinatenachse
Z	-	Ordnungszahl eines chemischen Elements
z	-	Koordinatenachse
Z_S	%	Zinssatz

Verzeichnis der griechischen Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
ΔH	kJ/kg	Schmelzenthalpie
ΔQ_B	C	elektrische Strahlladung während der Zeitspanne Δt
ΔT	K	Temperaturdifferenz, Temperaturerhöhung
Δt_A	s	Dauer des Aufladevorgangs
Δt_B	s	Bestrahlungsdauer
Δt_{Sim}	s	Zeitschrittweite für die Simulation
δ	1/K	normalverteilte, skalierbare Funktion
ε	-	Emissionskoeffizient
ε_0	C/(Vm)	elektrische Feldkonstante
ε_{eff}	-	effektiver Emissionskoeffizient des Pulvers
ε_k	-	Emissionskoeffizient des kompakten Werkstoffs
ε_{pl}	-	plastische Dehnung
ε_{th}	-	thermische Dehnung
ε_Z	-	Emissionskoeffizient der Zwischenräume
Θ	°	Kontaktwinkel
η_F	-	Wirkungsgrad der Strahlführung
η_V	-	Verfahrenswirkungsgrad
λ	W/(m²K)	Wärmeleitfähigkeit
λ_c	W/(m²K)	Wärmeleitfähigkeit des Kerns
λ_{eff}	W/(m²K)	effektive Wärmeleitfähigkeit des Pulvers
λ_{eff_WL}	W/(m²K)	anteilige Wärmeleitfähigkeit des Pulvers durch Wärmeleitung
λ_{eff_WS}	W/(m²K)	anteilige Wärmeleitfähigkeit des Pulvers durch Wärmestrahlung

λ_g	W/(m ² K)	Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gases
λ_p	W/(m ² K)	Wärmeleitfähigkeit des Partikelfeststoffs
μ	-	Haftreibungskoeffizient
μ_0	Vs/(Am)	magnetische Feldkonstante
π	-	Kreizahl Pi
ρ	kg/m ³	Dichte
$\rho_{\text{Flüssigkeit}}$	kg/m ³	Dichte der Messflüssigkeit an Luft
ρ_{kompakt}	kg/m ³	Dichte des kompakten Feststoffs
$\rho_{\text{Messkörper}}$	kg/m ³	Dichte des Messkörpers
ρ_{Pulver}	kg/m ³	absolute Dichte des Pulvers
ρ_{rel}	%	relative Dichte
$\rho_{\text{Schüttung}}$	%	Schüttungsdichte des Pulvers
σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ_B	m	Standardabweichung
σ_{comp}	N/m ²	Druckspannung
σ_L	N/m	Oberflächenspannung der Flüssigkeit L
σ_{LO}	N/m	Grenzflächenenergie zwischen der Flüssigkeit L und der Festkörperoberfläche O
σ_O	N/m	freie Oberflächenenergie
σ_{tens}	N/m ²	Zugspannung
φ	-	Abflachungskoeffizient
χ	1/(Ω m)	elektrische Leitfähigkeit
Ψ	-	Schüttungsporosität
∂	-	partiell Differential

1 Einleitung und Grundlagenbetrachtung

1.1 Gegenwärtige Situation produzierender Unternehmen

Zahlreiche produzierende Unternehmen in Hochlohnländern, wie z. B. in Deutschland, stehen vor wachsenden Herausforderungen durch einen beschleunigten Wandel der Märkte. Die Haupttreiber dieses Wandels sind in veränderten Rahmenbedingungen des Wettbewerbs und im technologischen Fortschritt zu sehen (SCHENK & WIRTH 2004). Hinzu kommt, dass wirtschaftliche und politische Veränderungen zu einer zunehmenden Globalisierung führen, welche in vielen Industriezweigen mit Deregulierungen sowie der Aufhebung von Handelsbeschränkungen einhergeht (SACHVERSTÄNDIGENRAT 2008). Dadurch treten neue Mitbewerber aus Niedriglohnländern, auch im Bereich hochwertiger Produkte und Spitzentechnologien, in den Markt ein. Es resultieren ein steigender Kostendruck, aber auch ein verschärfter Wettbewerb, der eine Verkürzung von Innovationszyklen und sinkende Produktlebenszeiten nach sich zieht (BAUMBERGER 2007).

Durch eine ansteigende Marktsättigung und eine gleichzeitig wachsende Produktivität hat sich in vielen Bereichen bereits eine Entwicklung vom Verkäufer- zum Käufermarkt vollzogen. Diese Tendenz wird auch von gesellschaftlichen Veränderungen unterstützt. Durch den demographischen Wandel sowie ein gestiegenes Wohlstands- und Bildungsniveau haben sich neuartige bzw. stark differenzierte Kundenanforderungen entwickelt (LINDEMANN et al. 2006; ZÄH et al. 2004). Der jederzeit mögliche Zugang zu neuen Medien und die damit zusammenhängende Informationsmöglichkeit zum Vergleich von Produkten führen zu einem kostenbewussten und anspruchsvollen Kundenverhalten (KRATOCHVÍL & CARSON 2005).

Nichtsdestotrotz ist es auch für Unternehmen am Standort Deutschland möglich, sich in diesem, vermehrt von Turbulenz geprägten, globalen Umfeld zu behaupten. Im Handel mit Technologiegütern erzielte Deutschland beispielsweise im Jahr 2005 einen Überschuss von 164 Mrd. € und wurde damit zum weltweit zweitgrößten Nettotechnologie-exporteur hinter Japan (EGELN 2007). Maßgeblich für den enormen Exporterfolg sind besonders die Branchen der gehobenen Gebrauchstechnologie. Darunter werden Unternehmen aus den Bereichen Fahrzeug-, Anlagen- bzw. Maschinenbau und der chemischen Industrie zusammengefasst. In der Spitzentechnologie (d. h. Luft- und Raumfahrt, Nachrichtentechnik, Computer und Elektronik) ist die Bilanz aus Exporten und Importen hingegen ausgeglichen (EGELN 2007). Abbildung 1 verdeutlicht die Relevanz der gehobenen Gebrauchs- sowie der Spitzentechnologie für die deutsche Volkswirtschaft.

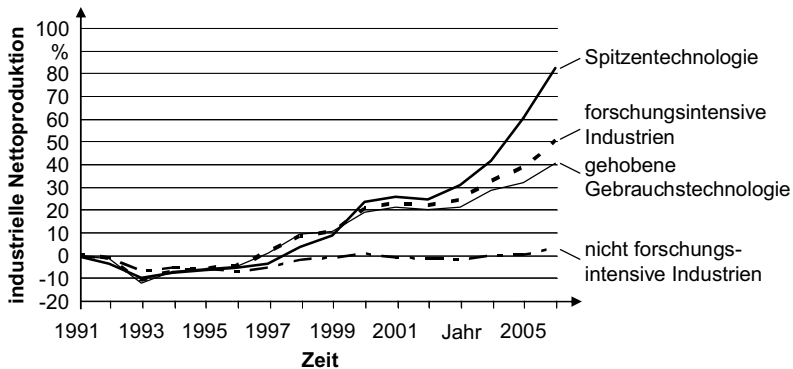


Abbildung 1: Veränderung der industriellen Nettoproduktion ausgewählter Wirtschaftszweige in Deutschland in Bezug auf das Jahr 1991 (GEHRKE et al. 2008)

In obiger Abbildung 1 werden mit dem Begriff „forschungsinensive Industrien“ sowohl die Bereiche der gehobenen Gebrauchstechnologie als auch Anbieter von Spitzentechnologien zusammengefasst. Zum Jahr 2006 wies der forschungsinensive Sektor ein auf den Betrag des Jahres 1991 bezogenes Wachstum der industriellen Nettoproduktion, d. h. dem Bruttoproduktionswert abzüglich der im Ausland erbrachten Vorleistungen, von 50 % auf. Demgegenüber konnten nicht forschungsinensive Industrien lediglich einen leichten Anstieg in Höhe von 4 % verzeichnen (GEHRKE et al. 2008). In diesem Zusammenhang muss ebenfalls erwähnt werden, dass die forschungsinintensiven Industrien im Jahr 2006 zu über der Hälfte (53,1 %) der Nettoproduktion beitrugen (GEHRKE et al. 2008). Dabei entfielen 14,0 % auf den Spitzentechnologiesektor (gegenüber 11,5 % im Jahr 2003) und 39,1 % auf gehobene Gebrauchsgüter. Zur Stärkung ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit zeigt sich in diesem Zeitraum damit die zunehmende Fokussierung der deutschen Industrieproduktion auf forschungsinensive Waren, speziell solche der Spitzentechnik.

Jedoch genügen für eine zukünftige Behauptung am Markt nicht alleine der Einsatz und die Herstellung gehobener Verbrauchs- und Spitzentechnologie. Vielmehr werden als Folge der o. g. dynamischen Rahmenbedingungen neuartige Methoden zur Bewältigung von ansteigenden Variantenzahlen, Nachfrageschwankungen, unsicheren Entwicklungs- und Herstellkosten sowie eines damit gestiegenen Innovationsrisikos benötigt (ZÄH 2006). Neben der Vernetzung der globalen Informations- und Warenströme ermöglichen neue IuK-Techniken in diesem Zusammenhang geänderte Produkt- und Produktionsansätze, wie z. B. einen vermehrten Einsatz mechatronischer Komponenten, Automatisierung und CAx-Techniken (KRATOCHVÍL & CARSON 2005).

Eine weitere viel versprechende Lösungsmöglichkeit, den o. g. Herausforderungen erfolgreich entgegenzutreten, ist die vollständig kundenorientierte Herstellung und Vermarktung individueller Produkte (*Mass Customization*) (ZÄH 2006). Wettbewerbsvorteile werden dabei durch eine Flexibilisierung der Produkte, Prozesse und Unternehmensstrukturen erreicht, wobei der Kunde mit seinen spezifischen Anforderungen in größerem Umfang als bisher in die Wertschöpfungsprozesse integriert wird (LINDEMANN et al. 2006). In diesem Zusammenhang ermöglichen neue IuK- und Produktionstechnologien die Unterstützung des Kunden bei der Identifikation seiner Bedürfnisse sowie eine Dynamisierung des gesamten Produkterstellungsprozesses. Kundenindividuelle Produkte können auf diese Weise schneller und kostengünstiger entwickelt, gefertigt und vertrieben werden als mit der heute vorherrschenden variantenreichen Serienproduktion. Damit kann optimal auf die marktseitig vorgegebene Komplexität reagiert werden (PILLER 2006).

Zur Umsetzung von *Mass Customization* genügen in den meisten Fällen jedoch keine singulären Modifikationen der Wertschöpfungskette, sondern es müssen weit reichende Änderungen innerhalb des gesamten Unternehmens umgesetzt werden. Neben einer Neuausrichtung des Auftragsmanagements sowie der Entwicklungsprozesse müssen die Fertigungsverfahren größere Flexibilität und Reaktionsfähigkeit aufweisen (REICHWALD & PILLER 2006). Vor dem genannten Hintergrund ist es heute nicht immer sinnvoll, die Produktionsverfahren auf möglichst geringe Herstellkosten bei hohen Stückzahlen zu optimieren. Vielmehr besteht die Hauptanforderung darin, Bauteile möglichst schnell und selbst bei sehr geringen Losgrößen wirtschaftlich herzustellen (WITT 2005).

In ZÄH (2006) werden die Anforderungen von *Mass Customization* den Entwicklungszielen der generativen Fertigungsverfahren gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass diese Verfahrensgruppe insbesondere für Metallbauteile aussichtsreiche Lösungsmöglichkeiten bietet. Daher widmet sich der folgende Abschnitt 1.2 zunächst den technologischen und wirtschaftlichen Nutzenaspekten durch den Einsatz der sog. Strahlschmelzverfahren (VDI 3404 2009). Im Sinne der später formulierten Zielsetzung der Arbeit (vgl. Unterabschnitt 1.5.1) liegt der Betrachtungsfokus im weiteren Verlauf einschränkend auf den strahlbasierten Technologien, bei welchen das Material in der Form von Pulverschichten mittels Elektronenstrahl verarbeitet wird.

1.2 Einführung in die Technologie des Strahlschmelzens

1.2.1 Nutzenaspekte durch den Einsatz des Strahlschmelzens

Mit dem Einsatz des Strahlschmelzens eröffnen sich neuartige technologische und wirtschaftliche Nutzenaspekte. Dies gilt insbesondere für solche Industriezweige, die metal-

liche Bauteile einerseits nur in geringen Stückzahlen benötigen und andererseits hohe Ansprüche an die mechanischen Eigenschaften oder den verwendeten Werkstoff stellen (ZÄH 2006). Die Schwerpunkte der Nutzung liegen daher vermehrt in den Bereichen der Luft- und Raumfahrt, des Anlagenbaus, des Werkzeug- und Formenbaus sowie der Medizintechnik (vgl. Abbildung 2).





Luft- und Raumfahrt	Anlagenbau	Werkzeug- und Formenbau	Medizintechnik
			
Triebwerksbauteil (Quelle: Morris Technologies, Inc.)	Pumpenflansch (Quelle: ARCAM AB)	Formeinsatz (Quelle: LBC Laser-BearbeitungsCenter GmbH)	Knieimplantat (Quelle: EOS GmbH)

Abbildung 2: Mittels Strahlschmelzverfahren hergestellte Beispielbauteile aus ausgewählten Branchen

Besonders im letzt genannten Anwendungsfeld, z. B. für Implantate oder Dentalrestaurationen, ist eine zunehmende Verbreitung der Technologie zu verzeichnen (KRUTH & VANDENBROUCKE 2007). Dies ist besonders auf das generative Funktionsprinzip des Strahlschmelzens (vgl. Unterabschnitt 1.2.2) zurückzuführen, wodurch die Herstellkosten von der Bauteilkomplexität entkoppelt sind. Dadurch können selbst komplexe Bauteile durch die patientenindividuelle Anpassung oftmals in sehr geringen Stückzahlen kostengünstig hergestellt werden (WITT 2005). Die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Fertigung selbst in Losgröße 1 ermöglicht überdies die Fertigung on-demand¹, beispielsweise zur Ersatz- oder Verschleißteilversorgung. Folglich können Kosten für Betriebsmittel und Lagerhaltung eingespart werden (WOHLERS 2007).

Des Weiteren verfügt das Strahlschmelzen über das Potenzial, eine ressourcenschonende Produktion zu realisieren, da Material nur an den vorgesehenen Stellen verfestigt wird. Überdies kann nicht aufgeschmolzener Werkstoff nach der Beendigung eines Fertigungsverfahren aufbereitet und einer erneuten Verarbeitung zugeführt werden. Die Möglichkeit der Reduktion des Materialaufwands gilt besonders für komplexe Metallbauteile, die bisher in umfangreichen Bearbeitungsschritten und mit hohen Zerspanvolumina, wie beispielsweise im Bereich der Luft- und Raumfahrttechnik, gefertigt wurden (RM-PLATFORM 2006). Hinzu kommt, dass für den Einsatz des Strahlschmelzens im Allgemeinen ein hohes Maß an Prozess-Know-how, insbesondere in Bezug auf werkstoffabhängige Prozessparametereinstellungen, benötigt wird. Somit ist der Einsatz

¹ Engl. für auf Anfrage (sinngem.)

nicht primär an manuelle Tätigkeiten gebunden. Vielmehr ist die erfolgreiche Anwendung an besonders qualifizierte Arbeitskräfte geknüpft, die bei der Anlagenbedienung überwiegend wissensintensive Tätigkeiten verrichten. Viele Unternehmen aus Hochlohnländern können dadurch von einer Verlagerung in Staaten mit niedrigeren Lohnniveaus absehen und ihre Produktionskapazitäten im eigenen Land halten (RM-PLATFORM 2006). Wie das im Folgenden erläuterte Funktionsprinzip verdeutlicht, entstehen Bauteile beim Strahlschmelzen in einem einstufigen Prozess, wodurch die Herstellung zudem ein hohes Maß an Automatisierbarkeit aufweist (ZÄH 2006).

1.2.2 Funktionsprinzip des Strahlschmelzens

Mit dem Begriff *Strahlschmelzen* werden nach VDI 3404 (2009) Fertigungsverfahren bezeichnet, die Pulvermaterial mittels Laser- oder Elektronenstrahl (EB, Electron Beam) vollständig aufschmelzen und schichtweise zu Metallbauteilen verarbeiten. Das Rohmaterial wird mit Hilfe eines Beschichtersystems auf einer Grundplatte aufgebracht, die um eine vordefinierte Höhe in Schritten von Bruchteilen eines Millimeters abgesenkt wird. Für das Beschichtersystem kommt meistens eine Klinge oder eine Rolle zum Einsatz (WITT 2005). Nach dem Verfestigungsschritt durch die Einkopplung der Strahlenergie wird die Grundplatte wiederum abgesenkt und ein erneuter Zyklus zur Schichterzeugung beginnt. Dieser Ablauf wiederholt sich so lange, bis die letzte Werkstückschicht bearbeitet ist und das fertige Bauteil entnommen werden kann (vgl. Abbildung 3; MEINDL 2005).

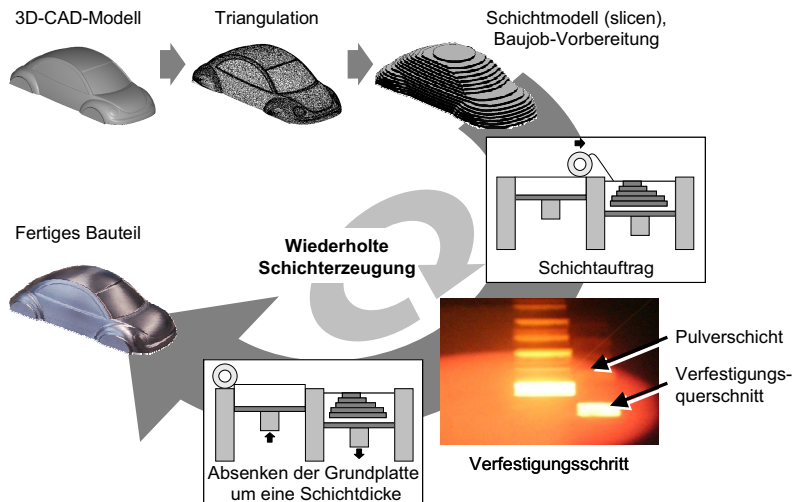


Abbildung 3: Funktionsprinzip des Strahlschmelzens in Anlehnung an MEINDL (2005)

Der Ausgangspunkt für die generative Fertigung ist ein digitales Modell des Bauteils, welches als Ergebnis eines Konstruktionsvorgangs typischerweise als 3D-CAD-Datensatz vorliegt. Die Oberflächen dieses Volumenmodells werden bei der folgenden Triangulation durch Dreiecke angenähert. Dieser Schritt, dessen Ergebnis eine Datei im Format .STL (Standard Triangulation Language) ist, wird benötigt, um die Bauteilinformation der weiteren Datenverbreitung in üblichen Anlagensteuerungen zur Verfügung stellen zu können (WITT 2005). Bevor der eigentliche Baujob, d. h. die wiederholte Schichterzeugung (vgl. Abbildung 3) beginnt, müssen das Werkstück im virtuellen Baubereich platziert sowie weitere Prozessparameter, wie z. B. die Strahlleistung, festgelegt werden. Sobald die Bauteilorientierung definiert ist, können die zugrunde liegenden Volumendaten auf zwei Dimensionen reduziert werden. Dieser sog. Slice-Vorgang führt zu einzelnen Schichten, welche sich dadurch auszeichnen, dass ihre Höhe dem realen Wert während des Baujobs (s. o.) entspricht (ZÄH 2006). Jeder Schichtquerschnitt wird geometrisch durch eine Aneinanderreihung von Scanvektoren, d. h. mit Energie beaufschlagter Linien definierter Länge (YADROITSEV et al. 2007), repräsentiert, die im Folgenden zur Strahlablenkung in der Fertigungsanlage benötigt werden.

Für das Strahlschmelzen sind bereits mehrere kommerzielle Anlagen am Markt erhältlich. Im Folgenden werden die verfügbaren Technologien daher vorgestellt und die Verfahrensvarianten gegeneinander abgegrenzt.

1.2.3 Begriffsdefinitionen und Verfahrensabgrenzung

Die am weitesten verbreiteten Technologien des Strahlschmelzens sind das *Direkte Metall-Lasersintern* (DMLS) der Firma EOS GmbH, das *Selective Laser Melting* (SLM) der Firmen MTT Technologies GmbH und Realizer GmbH sowie das *LaserCUSING* der Firma Concept Laser GmbH (WITT 2005). Hinzu kommt das ebenfalls kommerziell verfügbare *Electron Beam Melting* (EBM), d. h. *Elektronenstrahlschmelzen*, des schwedischen Unternehmens ARCAM AB. Als Bezeichnung für dieses Verfahren wurde bisher oftmals auch der Begriff *Elektronenstrahlsintern* (Electron Beam Sintering, EBS) verwendet (ZÄH 2006). Im Rahmen gegenwärtiger Normungsaktivitäten, u. a. der VDI 3404 (2009), wird dafür jedoch die Bezeichnung *Elektronenstrahlschmelzen* empfohlen. Die vorliegende Arbeit sieht daher von der Verwendung des Ausdrucks *Elektronenstrahlsintern* ab.

Das technologische Grundprinzip aller strahlbasierten generativen Fertigungsverfahren ist weitgehend vergleichbar (vgl. Abbildung 3). Die größten Unterschiede bestehen hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Strahlquellen sowie in Bezug auf variierende Anlagenkonzepte. Diesbezüglich sind besonders die verarbeitbaren Werkstoffen sowie die verwendeten Scanstrategien zu nennen. Unter dem Begriff *Scanstrategie* werden hierbei die geometrischen Muster zur Verfestigung des jeweiligen Bauteilquerschnitts sowie die

Einstellungen relevanter Prozessparameter zusammengefasst (KAHNERT et al. 2007; YADROITSEV et al. 2007).

Beim Strahlschmelzen werden einsatzfähige Teile im gewünschten Werkstoff in einem einstufigen Prozess hergestellt, wobei gegebenenfalls die Entfernung von Stützstrukturen und eine Reinigung erforderlich sein können (VDI 3404 2009). Der zentrale Prozess, d. h. die generative Fertigung, besteht dennoch aus einem einzigen Schritt. Daher werden diese Verfahren auch als einstufige Prozesse bezeichnet. Sie stehen damit im Gegensatz zu den mehrstufigen Prozessen, mit denen einsatzfähige Werkstücke in mehreren Schritten, teilweise mit Hilfe eines Laserstrahls, entstehen (VDI 3404 2009). Im Vergleich zu den einstufigen Prozessen lassen sich die dafür verwendeten Technologien, wie z. B. das IMLS (Indirektes Metall-Lasersintern) nur sehr eingeschränkt mit dem Elektronenstrahlschmelzen vergleichen.

Da mit der vorliegenden Arbeit ein Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens geleistet werden soll, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf die EB-Technologie. Zum besseren Verständnis sind zunächst die Grundlagen des Verfahrens dargestellt. Dabei werden, ausgehend von der Strahlerzeugung und -formung, anwendungsrelevante Kennwerte eingeführt sowie die Strahleinkopplung in Metallen aus energetischen Gesichtspunkten diskutiert. Abschließend gibt der Abschnitt 1.3 einen Überblick über den Aufbau der im Rahmen der Arbeit verwendeten Demonstratoranlage.

1.3 Grundlagen des Elektronenstrahlschmelzens

1.3.1 Einführung in die Elektronenstrahltechnik

Erzeugung eines Elektronenstrahls

Die anlagentechnische Grundlage aller elektronenstrahlbasierten Verfahren ist eine sog. Strahlkanone. Damit werden Elektronen erzeugt, beschleunigt, zu einem Strahl geformt und zum Prozessort geführt. Die Emission freier Elektronen geschieht nach SCHULTZ (2000) in technischen Anwendungen vor allem mit Hilfe von Glühkathoden aus Wolfram oder Tantal. Die entstehende Elektronenwolke erfährt eine Kraft in Richtung der Anode, da durch die Beschleunigungsspannung U_A eine Potenzialdifferenz zur Kathode resultiert (vgl. Abbildung 4). Daher werden Kathode und Steuerelektrode durch einen Isolator vom restlichen Erdpotenzial getrennt.

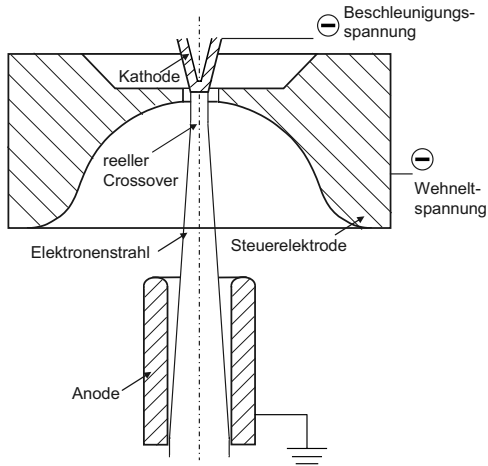


Abbildung 4: Aufbau des Strahlerzeugerraums eines Triodensystems in Anlehnung an SCHULTZ (2000)

Nach Durchlaufen des Potenzialfelds besitzen die Elektronen unter Berücksichtigung der Gesetze der Relativitätstheorie die Geschwindigkeit v_e , welche wie folgt berechnet wird (vgl. Gl. (1); SCHILLER et al. 1977).

$$v_e = c_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{(1 + e \cdot U_A \cdot m_0^{-1} \cdot c_0^{-2})} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Darin stehen c_0 für die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, m_0 für die Elektronenruhemasse, U_A für die Beschleunigungsspannung und e für die Elementarladung (SCHILLER et al. 1977). Für einen exemplarischen Wert von $U_A = 100 \text{ kV}$ beträgt die Geschwindigkeit der Strahlelektronen ca. 55 % der Lichtgeschwindigkeit.

Der Erzeugerraum heutiger Elektronenstrahl-Bearbeitungsanlagen besteht, wie in Abbildung 4 veranschaulicht, aus Kathode, Steuerelektrode und Anode und wird auch als *Triodensystem* bezeichnet. Es verfügt im Gegensatz zum *Diodensystem* zusätzlich über eine Steuerelektrode, mit der durch Anlegen der sog. Wehneltspannung der Anteil der Elektronen, der sich von der Kathode in Richtung der Anode bewegt, bestimmt werden kann. Damit kann die Beschleunigung der Ladungsträger auch vollständig unterbunden und auf diese Weise die Strahlleistung $P_B = 0 \text{ W}$ gesetzt werden. Die Trioden-

systeme weisen durch ihr elektrisches Feld einen ersten Fokus des Strahls, den sog. *Crossover*² zwischen Kathode und Anode auf (SCHULTZ 2000).

Aufbau einer Elektronenstrahlkanone

Der Strahlerzeugerraum bildet den obersten Abschnitt einer sog. Elektronenstrahlkanone (vgl. Abbildung 5), welcher durch die Anode und die Zentrierspule abgeschlossen wird.

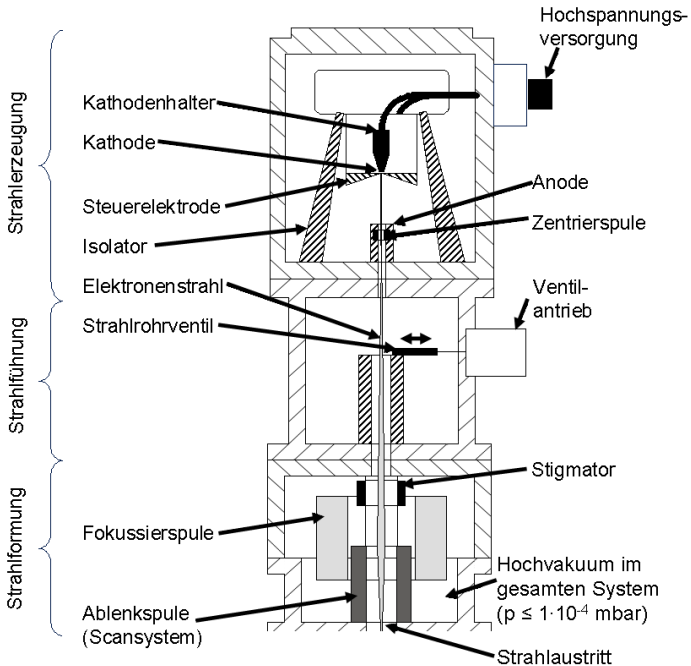


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Elektronenstrahlkanone

Durch die Zentrierspule erfährt der erzeugte Strahl eine erste Korrektur, um dem frühzeitigen Aufweiten aufgrund der gleichpoligen Ladung der Elektronen entgegenzuwirken (SCHULTZ 2000). Nach Verlassen des Strahlerzeugers durchqueren die Ladungsträger den Bereich der Strahlführung. Darin ist das Strahlrohrventil enthalten, welches es ermöglicht, die Strahlerzeugung und -führung hermetisch vom Rest der Kanone bzw. von der Bearbeitungskammer zu trennen. Im gesamten System muss aus verschiedenen

² Engl. für Kreuzungspunkt

Gründen ein Hochvakuum mit einem Druck von maximal $1 \cdot 10^{-4}$ mbar herrschen (SIGL 2008). Zum einen wird damit vermieden, dass die glühende Kathode oxidiert. Zum anderen werden Kollisionen zwischen Elektronen und den deutlich schwereren Luftmolekülen wesentlich reduziert. Damit kann der Strahl besser fokussiert und eine hohe Leistungsdichte erzielt werden. Des Weiteren unterbindet ein ausreichendes Vakuum wegen des fehlenden Trägermediums für einen Lichtbogen das Auftreten von elektrischen Überschlügen zwischen Anode, Kathode und Steuerelektrode (SCHULTZ 2000).

Der Strahl wird im Bereich der Strahlformung zunächst durch einen elektro-magnetischen Stigmator korrigiert. Dies ist notwendig, da der Strahlauffreffpunkt auf der Werkstückoberfläche aufgrund elektrischer und magnetischer Störeinflüsse anderenfalls elliptische Formen annimmt. Die damit einhergehende Abweichung von der Rotationssymmetrie des Elektronenstrahls wird auch als *astigmatischer Fehler* bezeichnet (SCHULTZ 2000). Zur Korrektur dieses Fehlers kommen in einem Stigmator zwei Paare sich gegenüberliegender, gleichpoliger Elektromagnete zum Einsatz, die die Form des Strahlquerschnittes durch unterschiedliche Anregung beeinflussen (SCHILLER et al. 1977).

Bereits im Bereich der Strahlführung verfügen die Elektronen zwar über ihre Endgeschwindigkeit v_e , jedoch muss die Leistungsdichte im Strahlquerschnitt für Bearbeitungsaufgaben, d. h. zur Temperaturerhöhung von Werkstoffen, noch gesteigert werden. Dies geschieht mittels Fokussierung in einer Ringspule, in der die Bewegungsrichtung der negativ geladenen Elektronen durch Magnetfelder beeinflusst wird. Diese sog. elektrooptischen Linsen bestehen aus vielen Drahtwicklungen, die von einem Eisenmantel umgeben sind. Bei Beaufschlagung mit Gleichstrom ergibt sich ein Magnetfeld, das analog zu einer lichtoptischen Sammellinse auf den Elektronenstrahl fokussierend wirkt, jedoch dessen Geschwindigkeit nicht beeinflusst. Durch eine Veränderung des Spulenstroms lässt sich damit die Fokusslage, also der Durchmesser des Strahlauffreffpunktes auf der Werkstückoberfläche, anpassen (SCHULTZ 2000).

Zur Änderung der Position des Auftreffbereichs wird der fokussierte Elektronenstrahl durch magnetische Felder aus seiner Ausgangsachse bewegt. Dies geschieht mit Hilfe eines Scansystems (vgl. Abbildung 5), welches aus vier paarweise angeordneten Spulen aufgebaut ist (SCHILLER et al. 1977). Diese bestehen aus mit Draht umwickelten Kernen und sind entsprechend den Hauptachsen der Anlage ausgerichtet. Durch eine geeignete Beaufschlagung mit Gleich- oder Wechselstrom wird der Strahl in X- oder Y-Richtung bzw. in jedem beliebigen Winkel aus seiner Ausgangslage abgelenkt. Wird das Ablenkensystem durch die Werkstoffauswahl für den Kern und die Spulenwicklungen so ausgelegt, dass es eine geringe Induktivität aufweist, so kann der Elektronenstrahl nahezu trägheitslos angesteuert werden. Damit ist eine quasi unbegrenzte Gestalt der Ablenkfiguren bzw. -geschwindigkeiten realisierbar (SCHULTZ 2000).

Technologisch relevante Elektronenstrahlkennwerte

Die Eigenschaften eines Elektronenstrahls lassen sich verschiedenartig variieren. Neben der konstruktiven Auslegung der Anlage sind die Abhängigkeit des Strahls vom Material und vom Zustand der Glühkathode sowie eine Vielzahl an Einstellmöglichkeiten zu nennen. Zur grundlegenden Charakterisierung eines Elektronenstrahls für technologische Prozesse werden vor allem die im Folgenden aufgeführten Größen herangezogen (SCHULTZ 2000).

Über die an der Steuerelektrode (vgl. Abbildung 5) anliegende Wehneltspannung werden die aus dem Kathodenbereich austretenden Elektronen und damit der Strahlstrom I_B definiert. Aus dem Produkt von I_B mit der Beschleunigungsspannung U_A lässt sich die Leistung des Elektronenstrahls P_B nach folgender Gleichung einstellen (SCHILLER et al. 1977):

$$P_B = I_B \cdot U_A \quad (2)$$

Entsprechend den oben aufgeführten Zusammenhängen erfährt der Elektronenstrahl durch die Fokussierspule eine mehr oder weniger starke Bündelung, welche sich nach der Höhe des anliegenden Linsenstroms I_L richtet. Zwar ist die Geschwindigkeit der Ladungsträger aufgrund der über dem Strahlquerschnitt identischen Beschleunigungsspannung U_A konstant, die Leistung unterliegt jedoch einer Intensitätsverteilung (SCHILLER et al. 1977).

Vorgänge bei der Energieeinkopplung eines Elektronenstrahls in Metalle

Die exakten physikalischen Abläufe beim Auftreffen von Strahlelektronen auf Metalloberflächen sind für das Verständnis aller industriell genutzten Elektronenstrahlverfahren von elementarer Bedeutung. Beispielsweise wird für die Modellierung der thermischen Abläufe des Elektronenstrahlschmelzens insbesondere die Bestimmung des von der Werkstückoberfläche absorbierten Strahlleistungsanteils benötigt.

Die meisten der ablaufenden Prozesse entziehen sich einer direkten experimentellen Beobachtung und wurden daher vorrangig theoretisch untersucht (SCHULTZ 2000). Aufgrund ihrer Komplexität können selbige jedoch nur vereinfacht wiedergegeben werden. Die Umwandlung der kinetischen Energie des Elektronenstrahls in Wärme führt zur Temperaturerhöhung in der Strahleindringzone, zur Wärmeleitung in die Umgebung sowie zur Wärmestrahlung der aufgeheizten Oberfläche. Eine Wärmeabfuhr aufgrund von Konvektion findet bei den meisten EB-Anwendungen aufgrund des vorherrschenden Vakuums nicht statt (WIESNER 1989).

Die beschleunigten Strahlelektronen dringen im Strahlschmelzprozess mit bis zu zwei Dritteln der Vakuumlichtgeschwindigkeit in den Pulverwerkstoff ein und kollidieren mit den freien Elektronen im Metallgitter und den Hüllelektronen der Gitteratome

(SCHULTZ 2000). Grundsätzlich kann ein Stoß zwischen Elektron und Atom dabei zu verschiedenen Ergebnissen führen. In den meisten Fällen wird die thermische Schwingungsenergie des Atoms als Folge des Zusammenstoßes erhöht und das sog. Primärelektron bewegt sich weiter in das Material mit geringfügig reduzierter kinetischer Energie hinein (MATZ 1999). In manchen Fällen erfahren Elektronen auch eine nahezu elastische Kollision mit den Atomkernen und werden mit sehr geringem Energieverlust entgegen der Eindringrichtung reflektiert (SCHEBESTA 1976; vgl. Abbildung 6).

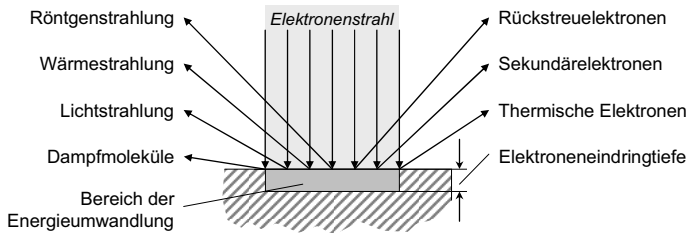


Abbildung 6: Elementarprozesse am Strahlauftreffort in Anlehnung an WIESNER (1989)

Beim Verlassen des Werkstoffs geben die Rückstreuелеktronen durch Interaktion mit anderen Atomen erneut Energie ab. Neben der Ablenkung der stoßenden Elektronen aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung verlieren sie bei jedem Stoß nur einen sehr kleinen Anteil ihrer Energie. Daher werden sehr viele Stöße benötigt, bis ein Strahlelektron seine Energie vollständig an den Werkstoff abgegeben hat (SCHILLER et al. 1977). Somit sind Elektronenstrahlprozesse durch eine Eindringtiefe im zweistelligen Mikrometerbereich in das beaufschlagte Material, das sog. Target³ (ARDENNE 1962), gekennzeichnet. Aus der beschriebenen Wechselwirkung mit den Werkstoffatomen entsteht durch den Strahl am Auftreffort Wärme, die das Auftreten von Dampfmolekülen zur Folge hat. Dabei verliert der Prozess je nach Werkstoff und eingestellten Strahlparametern ca. 1 % der eingebrachten Strahlleistung (DVS 3209 1995). Weitere Verluste sind durch Rückstreu-, Sekundär- und thermische Elektronen sowie durch Röntgenstrahlung zu erwarten (vgl. Abbildung 6; SCHUMACHER 1964). Im Folgenden werden die entsprechenden Entstehungsmechanismen dargestellt und die mit den Energieformen einhergehenden Verluste quantifiziert.

Entsprechend obiger Beschreibung wird ein Teil der Primärelektronen entweder unmittelbar an der Werkstoffoberfläche elastisch reflektiert oder diffundiert nach dem Eindringen und einer teilweisen Energieabgabe an die Werkstückoberfläche zurück (SCHULTZ 2000). Die emittierten Elektronen besitzen dabei ein Energiespektrum, welches bis zur Energie der Strahlelektronen reicht. Der Anteil der rückgestreuten Elektro-

³ Engl. für Ziel

nen, ihr Spektrum und ihre Richtungsverteilung werden in erster Linie durch die Ordnungszahl Z , die Form der Werkstückoberfläche sowie den Winkel zwischen der Normalen der beaufschlagten Fläche und der Einfallrichtung des Elektronenstrahls bestimmt (SOMMERKAMP 1970). Der Anteil der im Prozess nicht nutzbaren Leistung durch Rückstreuелеktronen wird in der aktuellen Literatur mit bis zu 20 % beziffert (DVS 3209 1995).

Ein weiterer Energiefluss aus der Prozesszone resultiert aus den sog. Sekundärelektronen. Diese entstehen durch Kollisionen der Primärelektronen mit den Leitungselektronen des Werkstoffs, indem die zuletzt genannten aus dem Metallgitter herausgeschleudert werden und das Material verlassen (SCHULTZ 2000). Bei der Energiebilanz von EB-Prozessen sind die Sekundärelektronenemission und die thermische Elektronenemission praktisch irrelevant, da die dadurch dem Prozess verloren gehende Leistung weniger als 0,1 % der Strahlleistung beträgt (SCHILLER et al. 1977).

Am Auftreffort entsteht neben den genannten Reflexionserscheinungen auch elektromagnetische Strahlung. Dabei tritt, abgesehen von Licht und Wärmestrahlung, auch die für Menschen schädliche Röntgenstrahlung auf, wobei der Verlustanteil durch die sichtbare Strahlung vernachlässigt werden kann (DVS 3209 1995). Die emittierte Röntgenstrahlung besteht aus den beiden Komponenten *charakteristische Röntgenstrahlung* und *Bremsstrahlung*. Die erstgenannte Strahlungsart hat ihren Ursprung in der Ionisation innerer Elektronenschalen der Targetatome und ist ebenfalls vernachlässigbar klein (SCHILLER et al. 1977). Die Bremsstrahlung wird durch die plötzliche Geschwindigkeitsänderung der Elektronen verursacht und ist abhängig von der Energie der Strahlenelektronen sowie von der Ordnungszahl Z des beaufschlagten Werkstoffs. Die durch Röntgenstrahlung entstehenden Energieverluste am Prozessort betragen beispielsweise für Stahl 0,4 % (DVS 3209 1995).

Die physikalischen Abläufe in der Strahleindringzone und die damit einhergenden Energieverluste sind für das Verständnis des Elektronenstrahlschmelzens besonders relevant. Gleiches gilt für eine detaillierte Beschreibung des Prozessablaufs sowie die eingesetzte Anlagentechnik, welche im Folgenden erläutert werden.

1.3.2 Anlagentechnik für das Elektronenstrahlschmelzen

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Demonstrator für das Elektronenstrahlschmelzen basiert auf einer Universalkammerschweißanlage, welche von der Firma probeam AG & Co. KGaA vertrieben wird. Dieses kommerzielle System wurde in Bezug auf seine Anlagen- und Steuerungstechnik modifiziert und damit zur Versuchsdurchführung für die generative Fertigung befähigt. Die Experimentalanlage verfügt über eine EB-Kanone (vgl. Abbildung 5), die auf der Oberseite der Bearbeitungskammer ange-

bracht ist, wobei der Strahl durch eine Schnittstelle zum sog. Auftragsmechanismus geführt wird (vgl. Abbildung 7).

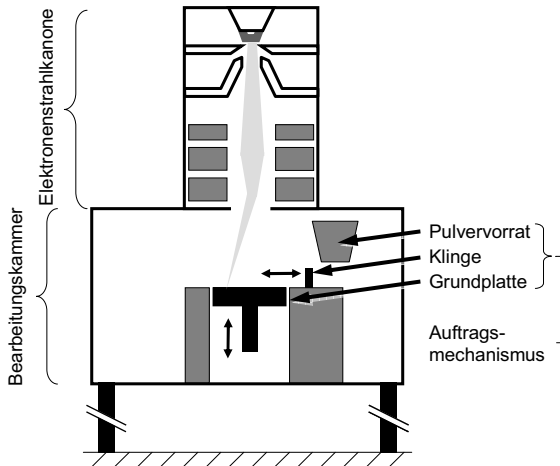


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des verwendeten Demonstrators für das Elektronenstrahlschmelzen

In der Bearbeitungskammer bewegen sich die Elektronen ebenfalls im Hochvakuum (vgl. Unterabschnitt 1.3.1) und treffen dort auf die Grundplatte, welche als Trägermaterial für die Pulverschichten dient und im Verlauf des Bauprozesses schrittweise abgesenkt wird. Als Beschichtersystem wird eine Klinge verwendet, die eine horizontale Pendelbewegung ausführt und dabei eine genügend große Materialmenge, die aus dem Pulvorrat bereitgestellt wird, aufträgt. Die Schichthöhe wiederum wird von der vertikalen Position der Grundplatte bestimmt (ZÄH 2007). Die unmittelbare Steuerung aller Komponenten übernimmt eine SPS in Verbindung mit einem externen Prozesssteuerungs-PC, mit welchem CAD-Dateien zu Schichtdaten verarbeitet werden und weitere Baujobdaten eingegeben werden können.

1.3.3 Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens

Wie bereits in Unterabschnitt 1.2.2 ausgeführt wurde, ist das Funktionsprinzip des Elektronenstrahlschmelzens dem des Laserstrahlschmelzens, d. h. SLM, LaserCUSING bzw. DMLS, sehr ähnlich. Bei allen Verfahren werden auf der Basis eines CAD-Modells Schichtinformationen erzeugt, die mit Hilfe einer Strahlquelle zur selektiven Verfestigung einer Pulverschicht genutzt werden. Das unterschiedliche physikalische Wirkprinzip des Elektronenstrahls macht jedoch eine Anpassung des Prozessablaufs notwendig

(vgl. Unterabschnitt 1.4.3). Im Vergleich zum Laserstrahlschmelzen weist die EB-basierte Fertigung einen zusätzlichen Prozessschritt auf, bei welchem das aufgetragene Pulver vor der eigentlichen Verfestigung mit Hilfe eines defokussierten Elektronenstrahls vorgeheizt wird (vgl. Abbildung 8).

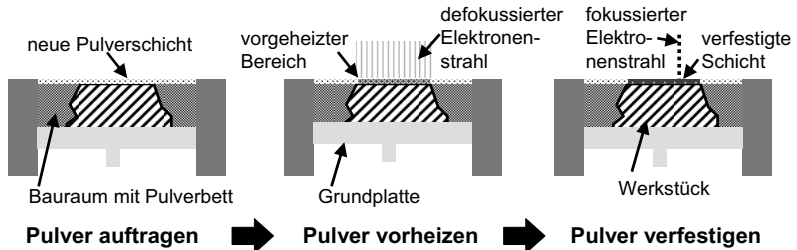


Abbildung 8: Verfahrensablauf des Elektronenstrahlschmelzens

Dadurch wird erreicht, dass sich das Rohmaterial erhitzt und sich Sinterhalse zwischen den einzelnen Pulverpartikeln ausbilden, wodurch einer Bewegung der Bestandteile durch das sog. Pulververblasen entgegengewirkt wird (SIGL et al. 2006). Darauf folgend beginnt das Verfestigen des Pulvers mit einem genügend stark fokussierten Strahl nach Vorgabe der hinterlegten Geometriedaten des aktuellen Schichtquerschnitts. Voraussetzung dafür ist, dass die im Strahlfleck gebündelte Energiedichte groß genug ist, um das Rohmaterial vollständig aufzuschmelzen.

Im folgenden Abschnitt 1.4 wird die Ausgangssituation der Arbeit im Bereich des Elektronenstrahlschmelzens erläutert. Dabei stehen zunächst sowohl die technischen als auch die wirtschaftlichen Potenziale der Anwendung eines Elektronenstrahls für die generative Fertigung metallischer Bauteile im Mittelpunkt der Betrachtungen. Im Anschluss wird der aktuelle Handlungsbedarf im Hinblick auf die Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens beleuchtet. Daraus leitet sich die Zielsetzung der Arbeit, welche in Abschnitt 1.5 formuliert wird, ab.

1.4 Ausgangssituation im Bereich des Elektronenstrahlschmelzens

1.4.1 Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens

Im Jahr 2006 standen über 200 verkauften Systemen zum Laserstrahlschmelzen gerade einmal 33 Elektronenstrahlschmelzanlagen der Firma ARCAM AB, dem einzigen kommerziellen Hersteller derartiger Maschinen, gegenüber (WOHLERS 2007). Dem hingegen

verdeutlicht der auf den Vorjahreszeitraum bezogene Zuwachs an verkauften EB-Anlagen in Höhe von 150 % zwischen Januar und Dezember 2006 das steigende Interesse von Industrie und Forschung an diesem Verfahren (WOHLERS 2007). Dies ist nicht zuletzt darin begründet, dass die heute noch geringen Bauraten generativer, metallverarbeitender Laser-Anlagen auf Pulverbett-Basis durch den Einsatz eines Elektronenstrahls als alternative Energiequelle um ein Vielfaches gesteigert werden können. Einige Autoren gehen von einer möglichen Zeitreduktion des Verfestigungsschrittes (s. o.) um den Faktor 50 aus (DOBENECK & LÖWER 2004).

Diese Verbesserung wird vor allem durch das physikalische Prinzip eines Elektronenstrahls ermöglicht, welcher sich von einem Laserstrahl durch drei physikalische Kriterien unterscheidet. Erstens besitzt er als Teilchenstrahl einen hohen Wirkungsgrad und zweitens lässt sich mit ihm eine nahezu unbegrenzt hohe Leistung übertragen. Als dritter Punkt ist nach DOBENECK et al. (2002) die fast trägheitslose Ansteuerbarkeit von Fokusslage, Strahlleistung und Position des Auftreffpunkts anzuführen. Hieraus ergeben sich für generative Anwendungen wesentliche technologische und wirtschaftliche Potenziale, die im Folgenden genannt werden.

Durch die Umsetzung sehr flexibel konfigurierbarer Strahlcharakteristika und -muster bis hin zur sog. Mehrstrahltechnik kann das Rohmaterial äußerst ökonomisch zu einer festen Schicht mit günstigen mechanischen Eigenschaften verarbeitet werden. Zum einen bringen neuartige Scanvektoren durch die Absenkung lokaler Temperaturgradienten im verfestigten Bereich das Potenzial zur Verringerung von Eigenspannungen im Bauteilgefüge mit sich. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die aufgeschmolzenen Bereiche im Anschluss an das selektive Verfestigen durch dieselbe Strahlquelle zusätzlich einer Wärmebehandlung zu unterziehen (SIGL 2008). Überdies kann der Strahl durch die hohe Ablenkfrequenz aufgeteilt und somit an verschiedenen Orten des Querschnitts quasi gleichzeitig zum Verfestigen eingesetzt werden. Aus der Realisierung der zuletzt genannten Maßnahme folgt eine wesentliche Bauzeitreduktion (KAHNERT et al. 2007).

Neben der hohen Ablenkfrequenz ist auch die enorme Leistungsdichte des Elektronenstrahls für die generative Fertigung relevant. Dadurch erweitert sich die verfügbare Bandbreite an verarbeitbaren Werkstoffen. So können im Elektronenstrahl-Verfahren beispielsweise auch Pulverlegierungen mit hohem Wolframgehalt bis hin zu reinem Wolfram⁴ aufgeschmolzen werden. Darüber hinaus wurde Warmarbeitsstahl 1.2343⁵, abgesehen von Oxideinschlüssen, porenfrei mittels Elektronenstrahlschmelzen verarbeitet. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass im Prozessort Vakuum vorherrscht

⁴ Schmelztemperatur von Wolfram $T_s = 3422\text{ °C}$ (STÖCKER 2007)

⁵ Nach früherer Nomenklatur: X37CrMoV5-1 (SEIDEL 1999)

(vgl. Unterabschnitt 1.3.2) und dadurch der Bildung von Gaseinschlüssen im Gefüge wesentlich entgegengewirkt wird (SIGL 2008).

1.4.2 Definition relevanter Fehlerbilder

Neben den im Vorangehenden diskutierten Verfahrenspotenzialen des Elektronenstrahlschmelzens existieren gegenwärtig verschiedene Prozessdefizite, die dazu führen, dass anforderungsgerechte Bauteile nicht oder nur unter einem erhöhten Aufwand, beispielsweise durch Wiederholungen von gesamten Baujobs, hergestellt werden können. Zur Fertigung eines für Praxisanwendungen relevanten Werkstücks ist die Generierung einer zusammenhängenden Gefügestruktur eine elementare Voraussetzung. Dies ist gegenwärtig allerdings nur sehr eingeschränkt möglich. Während des Elektronenstrahlschmelzens treten negative Effekte auf, deren Auswirkungen in die drei Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* sowie *Schichtablösung* unterteilt werden. Im Folgenden werden diese Fehlerbilder näher erläutert.

Fehlerbild Pulververblasen

Durch Versuche an einzelnen Pulverschichten wurde bereits in einer frühen Phase der Technologieentwicklung festgestellt, dass die aufgetragenen Partikel unter bestimmten Prozesszuständen plötzlich beschleunigt werden (ZÄH 2003). Dieses sog. Pulververblasen ist dann zu beobachten, wenn die aufgetragene Schicht bei Raumtemperatur mit dem Elektronenstrahl beaufschlagt wird (vgl. Abbildung 9). Tritt dieser Effekt während des Bauprozesses auf, wird die zuletzt aufgebrachte Pulverschicht zerstört, wodurch der Schichtauftrag wiederholt werden muss. Daneben führt das Pulververblasen zum Abbruch der Fertigung, falls es dauerhaft eintritt. Neben der eingeschränkten Prozesssicherheit wird durch diesen Effekt die Prozessführung hin zu höheren Temperaturen verlagert, da die aufgetragene Pulverschicht, wie in Unterabschnitt 1.3.3 dargestellt, vorgeheizt werden muss. Dies wirkt sich sowohl auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens als auch auf die Haltbarkeit bzw. die Auslegung von Anlagenkomponenten negativ aus.

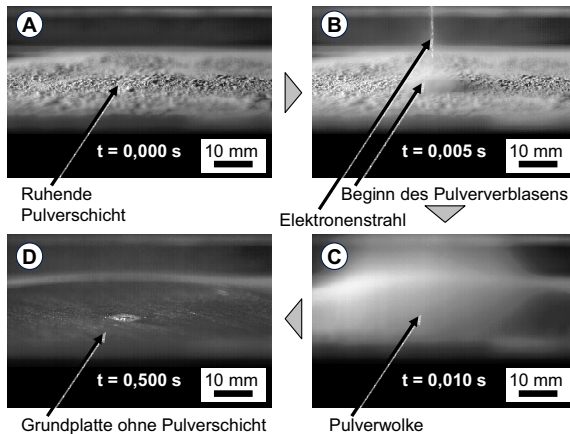


Abbildung 9: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Fehlerbildes Pulververblasen nach SIGL et al. (2006)

In Aufnahme A (Abbildung 9) ist auf einer Grundplatte eine ca. 1 mm hohe Pulverschicht zu erkennen. Die Partikel aus der Legierung 1.2343 besitzen eine sphärische Form und ihr Durchmesser beträgt zwischen $20\text{ }\mu\text{m}$ und $63\text{ }\mu\text{m}$ (SIGL et al. 2006). Zum Zeitpunkt $t = 0,000\text{ s}$ wird der Elektronenstrahl mit einer Leistung von $P_B = 100\text{ W}$ eingeschaltet und trifft auf die Pulverschicht. Zum Zeitpunkt $t = 0,005\text{ s}$ (Aufnahme B) ist zu erkennen, wie die Partikel im Umkreis von ca. 10 mm des Strahlauffreffbereichs in Bewegung sind. Nach weiteren 0,005 s zeigt Aufnahme C, dass praktisch die gesamte Pulverschicht vorrangig in vertikaler Richtung beschleunigt wurde. Nach $t = 0,500\text{ s}$ (vgl. Aufnahme D) befinden sich keine Pulverpartikel mehr auf der Grundplatte, sondern sie sind in der gesamten Bearbeitungskammer verteilt (SIGL et al. 2006).

Fehlerbild Schmelztropfenbildung

Der Begriff *Schmelztropfenbildung* bezeichnet das Phänomen der Ausbildung einer Vielzahl kugelförmiger Körper aus dem aufgeschmolzenen Material. Die entstehenden tropfenförmigen Anhäufungen verbinden sich nur teilweise mit der darunterliegenden Schicht und führen daher zu einer signifikanten Verringerung der Oberflächenqualität und der Dichte des Werkstücks (vgl. Abbildung 10).

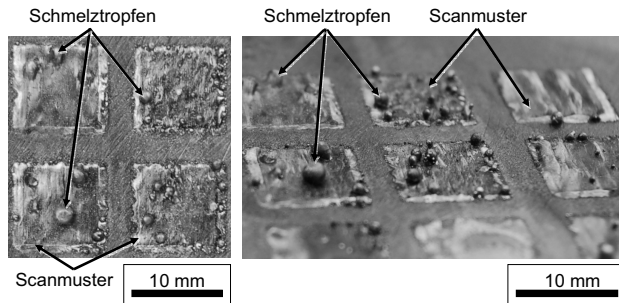


Abbildung 10: Verschiedene Ausprägungen des Fehlerbildes Schmelztropfenbildung beim Elektronenstrahlschmelzen von Edelstahl 1.4404⁶

Je nach Form und Größe überragen die Schmelztropfen die eingestellte Schichthöhe. Sobald Schmelztropfenbildung auftritt, beeinträchtigt dies nicht nur die Ebenheit der anschließend aufgetragenen Pulverschicht, sondern verhindert auch eine Fortsetzung des Bauprozesses. Dies ist auf das Blockieren der Klingenbewegung beim Beschichten zurückzuführen, was u. U. zu Beschädigungen der Anlage führen kann.

Fehlerbild Schichtablösung

Die im Vorangehenden definierten Fehlerbilder *Pulververblasen* und *Schmelztropfenbildung* treten auf, bevor der Pulverwerkstoff zu einer kompakten bzw. massiven Schicht verfestigt werden kann. Im Gegensatz dazu ist das Fehlerbild *Schichtablösung* dadurch definiert, dass das Material bereits in der letzt genannten Form, d. h. als zusammenhängendes und massives Gefüge in horizontaler Ebene mit der eingestellten Schichthöhe, erstarrt ist. Tritt Schichtablösung auf, so ist zu beobachten, dass sich eine Lage oder mehrere Lagen des Bauteils von dem darunterliegenden Material lösen und eine Aufbiegung dieser Bereiche stattfindet (vgl. Abbildung 11).

⁶ Nach früherer Nomenklatur: X2CrNiMo17-12-2 (SEIDEL 1999)

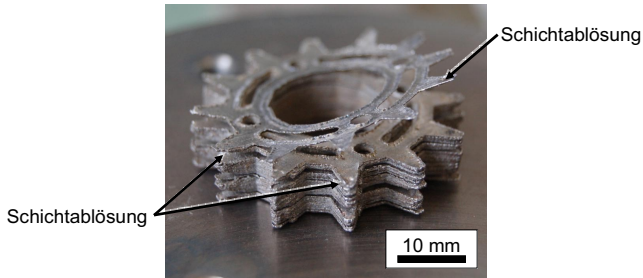


Abbildung 11: Fehlerbild Schichtablösung in verschiedenen Bereichen eines Bauteils

Die Schichten können sich entweder im Verlauf eines Baujobs oder im Anschluss daran ablösen. Falls sich eine Schicht bereits während der Herstellung aufbiegt, sollte der Fertigungsprozess abgebrochen werden, da die Klinge sonst mit den aufgebogenen Bereichen kollidiert und dadurch beschädigt werden kann. Wird eine Schichtablösung hingegen erst nach Abschluss des Bauprozesses erkannt, so muss die Fertigung wiederholt werden, da die Festigkeit des betreffenden Bauteils wesentlich eingeschränkt ist.

Die genannten Fehlerbilder reduzieren die Prozesssicherheit des Elektronenstrahlschmelzens erheblich. Daraus erwächst der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit, der im Folgenden ausführlich beschrieben wird.

1.4.3 Handlungsbedarf zur Prozessbeherrschung

Wie Unterabschnitt 1.2.2 zu entnehmen ist, verfügt das Elektronenstrahlschmelzen über das Potenzial, für die Herstellung metallischer Bauteile in einem breiten industriellen Umfeld zunehmend eingesetzt zu werden. Als Voraussetzung sind erhöhte Anforderungen an die erzielbare Prozesssicherheit zu erfüllen. Ein Produktionsprozess ist nur dann als „sicher“ zu bezeichnen, wenn er beherrscht und fähig ist und die reproduzierbare Fertigung eines festgelegten Arbeitsergebnisses ermöglicht (WECK 1996; vgl. Abbildung 12).

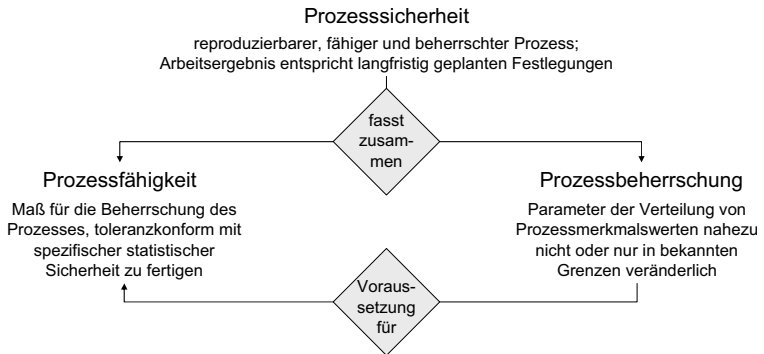


Abbildung 12: Definition und Zusammenhang von Prozessfähigkeit und Prozessbeherrschung für Produktionsprozesse in Anlehnung an EICHGRÜN (2003)

Ein Prozess, wie beispielsweise das Elektronenstrahlschmelzen, wird nach der Norm als „beherrscht“ bezeichnet, wenn der Wertebereich der produktbezogenen Ausgangsgrößen bekannt ist, d. h. die Verteilung der Merkmalswerte konstant ist oder sich praktisch nur in bekannten engen Grenzen ändert (DIN 55350 1993). Demgegenüber gilt ein Prozess als fähig, wenn er beherrscht ist und langfristig Überschreitungen festgelegter Toleranzen am Werkstück aufgrund unvermeidbarer stochastischer Streuung mit einer bekannten statistischen Sicherheit ausgeschlossen werden können (DIN 55350 1993).

Solange die Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* beim Elektronenstrahlschmelzen auftreten, können keine produktbezogenen Ausgangsgrößen untersucht werden, da eine Herstellung von Bauteilen nicht möglich ist. Das bedeutet, dass gegenwärtig weder von Prozessfähigkeit noch von Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens ausgegangen werden kann. Der Handlungsbedarf besteht demnach darin, die Voraussetzung zur Prozessbeherrschung zu schaffen. Dies wird insbesondere dann ermöglicht, wenn dreidimensionale Bauteile ohne das Auftreten von Prozessabbrüchen aufgrund der o. g. Fehlerbilder (s. o.) angefertigt werden können. Aus diesem Handlungsbedarf lässt sich unmittelbar die Zielsetzung der Arbeit ableiten, die im Folgenden definiert ist.

1.5 Zielsetzung und Vorgehensweise

1.5.1 Zielsetzung

Auf der Basis des in Unterabschnitt 1.4.3 erläuterten Handlungsbedarfs ergibt sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit. Die Zielsetzung besteht darin, einen Beitrag zur

Beherrschung der Herstellung von dreidimensionalen Geometrien, d. h. von Bauteilen mit einer geschlossenen und zusammenhängenden Gefügestruktur, mittels Elektronenstrahlschmelzen zu leisten. Dies wird nur erreicht, wenn die aktuell dominierenden Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* geklärt und geeignete Maßnahmen zu ihrer Eliminierung konzipiert und umgesetzt werden.

Die Voraussetzung dafür bildet ein grundlegendes Verständnis für die ablaufenden Prozesse beim Elektronenstrahlschmelzen. Dazu bedarf es der mathematischen Beschreibung bestimmender Abläufe. Hierbei sind insbesondere die Gegebenheiten bei der Energieeinkopplung des Elektronenstrahls in das Material sowie die temperaturabhängigen Eigenschaften des verwendeten Pulverwerkstoffs zu berücksichtigen. Mit einem darauf aufbauenden Simulationsmodell sollen Wertebereiche für relevante Prozessparameter bestimmt werden. Die erzielten Ergebnisse bedürfen des Nachweises der Praxisrelevanz durch die Herstellung von dreidimensionalen Probekörpern.

1.5.2 Struktur der Arbeit

Um die in Unterabschnitt 1.5.1 formulierte Zielsetzung zu erreichen, wird die Arbeit entsprechend des in Abbildung 13 vorgestellten Schemas strukturiert.

Kapitel 1	Einleitung und Grundlagenbetrachtung	
	Einführung in das Strahlschmelzen	
	Grundlagen des Elektronenstrahlschmelzens	
	Handlungsbedarf	Zielsetzung und Vorgehensweise
Kapitel 2	Stand der Erkenntnisse	
	Aktueller Wissensstand hinsichtlich:	Pulververblasen (Fehlerbild 1)
		Schmelztropfenbildung (Fehlerbild 2)
		Schichtablösung (Fehlerbild 3)
Kapitel 3	Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens	
	Methodenkonzeption	Systemanalyse durch Formalisierung
	Reduktion der Betrachtungskomplexität durch systemtechnische Analyse	
	Bestimmung relevanter Ein- und Ausgangsgrößen	
Kapitel 4	Analytische Prozessmodellierung	
	Phasenmodell für das Pulververblasen	Bestimmung relevanter Prozessparameter
	Untersuchung thermischer Abläufe beim Elektronenstrahlschmelzen	
	Wärmequellendefinition	Modellierung effektiver Materialkennwerte
Kapitel 5	Numerische Lösung des thermischen Prozessmodells	
	Implementierung des thermischen Prozessmodells und Simulationsversuche	
	Überprüfung des Simulationsmodells (Validierung)	Eliminierung von Schmelztropfenbildung und Schichtablösung
Kapitel 6	Umsetzung der Modellierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	
	Eliminierung des Pulververblasens	
	Herstellung von Probekörpern ohne Schmelztropfenbildung und Schichtablösung	
	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	
Kapitel 7 Schlussbetrachtung		

Abbildung 13: Struktur der Arbeit

In Kapitel 1 wird der Leser zunächst mit den wirtschaftlichen und technologischen Potenzialen vertraut gemacht, die sich durch den Einsatz des Elektronenstrahlschmelzens eröffnen. Im Anschluss daran vermittelt dieses Kapitel die Grundlagen der Elektronenstrahltechnik und stellt den verwendeten Anlagendemonstrator sowie den Prozessablauf des untersuchten Verfahrens vor. Aus der Betrachtung der aktuellen Fehlerbilder und der Forderung nach einer beherrschten Bauteilfertigung folgt die Zielsetzung. Den Abschluss des Kapitels bilden die Strukturierung der Arbeit sowie die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs.

Im Kapitel zum Stand der Erkenntnisse (vgl. Kapitel 2) wird die Basis für die spätere Prozessmodellierung gelegt. Dazu dient eine detaillierte Diskussion der Erkenntnisse in Bezug auf die im vorangehenden Kapitel definierten Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* sowie *Schichtablösung*. Diesbezüglich sind lediglich Erklärungsansätze für das Pulververblasen im Bereich der elektronenstrahlbasierten generativen Fertigung verfügbar. In Bezug auf die Schmelztropfenbildung sowie die Schichtablösung wird daher auf Modelle aus einem ähnlichen Bereich, dem des Laserstrahlschmelzens, zurückgegriffen.

Das Kapitel 3 widmet sich zunächst der Konzeption einer Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Die in der Methode enthaltene Vorgehensweise zur Komplexitätsreduktion beruht auf der Systemtechnik und wird anschließend angewendet, um die für die Zielsetzung der Arbeit notwendige Detaillierungsebene des Prozessmodells zu schaffen. Dieser Schritt geht insbesondere mit der Bestimmung der relevanten Ein- und Ausgangsgrößen des Teilsystems, das in Kapitel 4 mathematisch beschrieben wird, einher. Zu dieser analytischen Prozessmodellierung zählt neben den Abläufen beim Pulververblasen auch ein thermisches Modell, das die Temperaturverteilung beim Verfestigen des Pulvers durch die Einkopplung der Strahlenergie beschreibt. Da die Zusammenhänge durch Differenzialgleichungen mit komplexen Randbedingungen, wie z. B. einer temperaturabhängigen Modellgeometrie, beschrieben werden, ist eine Lösung auf der Basis numerischer Methoden erforderlich.

Die entsprechende Implementierung nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist anschließend Gegenstand von Kapitel 5. Durch die Auswertung des anhand von realen Temperaturmessungen validierten Simulationsmodells werden Erkenntnisse generiert, die zur Erstellung von anforderungsgerechten Probekörpern und Strukturgeometrien (Kapitel 6) verwendet werden. Dabei geht der Betrachtungsrahmen über die erstellten Demonstratorbauteile hinaus und beleuchtet ebenso die ökonomischen Potenziale, die bei der Herstellung komplexer Geometrien mittels Elektronenstrahlschmelzen im Vergleich zu laserstrahlbasierten generativen Verfahren nutzbar werden.

Wie im weiteren Verlauf zu zeigen sein wird, beeinflusst eine Vielzahl von Eingangsgrößen unterschiedlicher Art und Bedeutung den Prozessverlauf und damit auch die bauteilbezogenen Ausgangsgrößen beim Elektronenstrahlschmelzen. Um einerseits die Komplexität der Untersuchungen in einem angemessenen Rahmen zu halten und andererseits weiteren Forschungsarbeiten die Möglichkeit einer fokussierten Betrachtung auf diesem Gebiet zu eröffnen, bedarf es einer Abgrenzung des Untersuchungsbereichs der vorliegenden Arbeit. Dieser Schritt ist Gegenstand des folgenden Unterabschnitts 1.5.3.

1.5.3 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Zur systematischen Abgrenzung des Untersuchungsbereichs sind grundsätzliche Festlegungen zu Beginn der Arbeit zu treffen. Dies bezieht sich zum einen auf die Scanmuster zur Schichtverfestigung und zum anderen auf die Legierung des Pulverwerkstoffs. Um den Anwendernutzen dieser Arbeit sicherzustellen, steht dabei die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis im Vordergrund.

Im Hinblick auf das verwendete Scanmuster hat sich die Unterteilung eines mit Strahlenergie zu beaufschlagenden Bauteilquerschnitts in sog. Grundmuster bzw. Elementarflächen etabliert (KAHNERT et al. 2007). Diesbezüglich kommen hauptsächlich Regelgeometrien zum Einsatz, die zur Füllung größerer Bereiche aneinander gefügt werden. Besonders wichtig für die Auswahl der Grundmuster ist die universelle Anwendbarkeit im Hinblick auf verschiedene Bauteilquerschnitte. Beispielsweise können Quadrate, im Gegensatz zu Kreisen, derart zu größeren Flächen zusammengesetzt werden, dass eine vollständige Füllung ohne Überschneidungen der Grundmuster erreicht wird (vgl. Abbildung 14). In den Randbereichen eines Bauteilquerschnitts können die Quadrate mit Hilfe einer Vielzahl heutiger Softwarepakete zur Prozesssteuerung beschnitten werden.

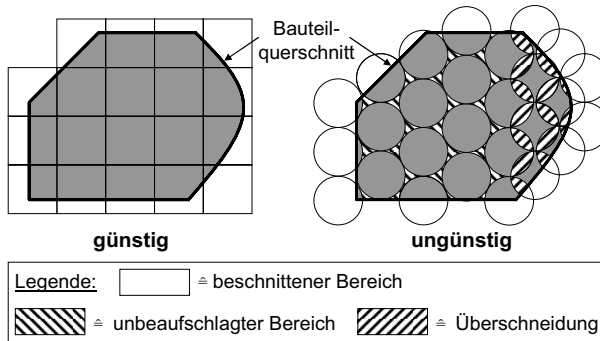


Abbildung 14: Füllung von Bauteilquerschnitten mit quadratischen (links) und kreisförmigen (rechts) Grundmustern

Da aufgrund des Zusammensetzens mit identischen Teilflächen nicht der gesamte Bauteilquerschnitt betrachtet werden muss, sondern die Berechnung einer Elementarfläche für die Untersuchung grundlegender Effekte im Rahmen der Prozesssimulation genügt, reduziert sich die Komplexität sowie die benötigte Rechenzeit wesentlich. Für das untersuchte quadratische Grundmuster existieren bereits umfassende Anwendungsfälle aus Wissenschaft und Industrie (u. a. in HERZOG 2002; YADROITSEV et al. 2007), so dass bereits auf verschiedene Vorarbeiten zurückgegriffen werden kann.

Bei der Auswahl der Legierung des Pulverwerkstoffs ist wiederum die industrielle Relevanz entscheidend. Unter Berücksichtigung der in Unterabschnitt 1.2.1 aufgezeigten Einsatzbereiche verfügt Edelstahl 1.4404 über entsprechend große Anwendungsfelder. In Bereichen des Anlagenbaus, des Werkzeug- und Formenbaus sowie der Medizintechnik ist seine Verwendung verbreitet, so dass die Voraussetzung für die praktische Relevanz der Ergebnisse gegeben ist. Die Festlegung auf diesen Werkstoff wird durch die Zugänglichkeit wichtiger Kennwerte unterstützt. Im Gegensatz zu dem Werkstoff 1.4404 sind für viele Legierungen temperaturabhängige Wertereihen für thermophysikalische Stoffgrößen, wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität sowie der Emissionskoeffizient, nicht in der Literatur verfügbar. Aufgrund zum Teil komplexer Analyseverfahren für Pulversysteme ist eine experimentelle Bestimmung der thermophysikalischen Stoffgrößen beliebiger Legierungen oftmals nur eingeschränkt möglich.

Zusammenfassend werden die beiden folgenden Festlegungen getroffen. Zum einen werden die Untersuchungen des Elektronenstrahlschmelzens für Edelstahl 1.4404 durchgeführt. Zum anderen kommen dabei quadratische Grundmustergeometrien zum Einsatz. Die Definition dieser Randbedingungen schließt das aktuelle Kapitel ab. In Kapitel 2 werden dem Leser die bislang vorliegenden Erkenntnisse zu den Fehlerbildern *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* vermittelt. Damit wird ein Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik im Hinblick auf die im weiteren Verlauf durchzuführende Modellierung gegeben.

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen diejenigen Prozessdefizite des Elektronenstrahlschmelzens eliminiert werden, die bisher der Herstellung von kompakten Bauteilen, d. h. von Werkstücken mit einem zusammenhängenden bzw. dichten Gefüge, entgegenstehen. Diese Prozessdefizite wurden im vorangehenden Kapitel in die drei Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* unterteilt. Das Kapitel 2 verfolgt darauf basierend das Ziel, den Leser mit dem Stand der Erkenntnisse in Bezug auf die drei genannten Fehlerbilder, d. h. mit Modellvorstellungen der damit einhergehenden Abläufe, vertraut zu machen.

Lediglich für das *Pulververblasen* kann bereits auf eine umfassende mathematische Beschreibung entsprechender Vorgänge beim Elektronenstrahlschmelzen zurückgegriffen werden. Dabei wurden verschiedene physikalische Mechanismen untersucht und der zugeordnete Einfluss bewertet. Als Ergebnis folgen die Entwicklung geeigneter Maßnahmen zur Vermeidung des *Pulververblasens* und eine Abschätzung ihrer Wirksamkeit.

Für die *Schmelztropfenbildung* sind hingegen keine Vorarbeiten aus dem Bereich des Elektronenstrahlschmelzens verfügbar. Allerdings tritt dieses Fehlerbild auch bei der laserstrahlbasierten generativen Fertigung in Erscheinung und es besteht ein Erklärungsansatz, der im Folgenden vorgestellt wird. Die beschriebenen Zusammenhänge betrachten die Entstehung von Schmelztropfen unabhängig von der eingesetzten Strahlquelle. Daher schließt dieser Abschnitt mit der Übertragung geeigneter Maßnahmen auf das Elektronenstrahlschmelzen zur Vermeidung dieses Fehlerbildes.

In Bezug auf die *Schichtablösung* sind ebenfalls Vorarbeiten für das Elektronenstrahlschmelzen verfügbar. Der im Folgenden beschriebene Erklärungsansatz beleuchtet die werkstoffbezogenen Vorgänge in der generativen Fertigung bei der selektiven Wärmeinbringung durch eine Strahlquelle, die zur Entstehung von Schichtablösung führen. Darauf basierend werden im Anschluss die Bedingungen zur Vermeidung dieses Fehlerbildes untersucht und auf das Elektronenstrahlschmelzen übertragen.

In Abschnitt 2.2 ist zunächst der aktuelle Wissensstand in Bezug auf das Fehlerbild *Pulververblasen* wiedergegeben.

2.2 Pulververblasen

2.2.1 Allgemeines

In der einschlägigen Literatur werden verschiedene physikalische Mechanismen als mögliche Ursachen für das Pulververblasen (vgl. Abbildung 9) diskutiert. Mit der Formulierung von Hypothesen zur Impulsübertragung, Thermodynamik, Elektrostatik und Elektrodynamik wird jeweils das Ziel verfolgt, die Größenordnung der wirkenden Kräfte auf ein repräsentatives Pulverpartikel und damit die hauptsächlichen Ursachen für das Verblasen zu identifizieren. Auf dieser Basis konnten von mehreren Autoren bereits Maßnahmen zur Unterbindung des Effekts konzipiert und umgesetzt werden (vgl. SIGL et al. 2006). Im Hinblick auf die o. g. Mechanismen wird im Folgenden der entsprechende Stand der Erkenntnisse dargestellt.

2.2.2 Erklärungsansatz

Impulsübertragung

Da der Elektronenstrahl aus massebehafteten Teilchen besteht, verursacht er beim Auftreffen auf das Pulverbett einen sog. Elektronenstrahldruck (CRAWFORD 1962). Die dadurch wirkende Kraft kann nach SIGL et al. (2006) aus dem mitgeführten Impuls eines Elektrons unter Berücksichtigung der speziellen Relativitätstheorie berechnet werden. Es ergibt sich für den Impuls eines Elektrons ein Wert von $1,79 \cdot 10^{-22}$ Ns. Der gemeinsame Impuls aller Elektronen wird auf die im Strahlauftreffbereich befindlichen Pulverpartikel übertragen. Diese erfahren eine Beschleunigung und verfügen danach über die kinetische Energie E_{kin} , die aufgrund der Energieerhaltung während der Partikelbewegung in die potenzielle Energie E_{pot} umgewandelt wird. Unter der Annahme, dass alle Pulverteilchen innerhalb der Einflusszone des Elektronenstrahls lediglich um 10 mm angehoben werden, kann der dafür notwendige Impuls p_{EB} sowie die Anzahl der dafür benötigten Elektronen abgeschätzt werden. Daraus leiten SIGL et al. (2006) eine Dauer von $\Delta t_{\text{B}} = 15$ s ab, die notwendig ist, um einen entsprechenden Energiebetrag durch Bestrahlung des Pulvers zu übertragen. Da nach Abbildung 9 jedoch das gesamte Pulverbett innerhalb von 0,500 s in Bewegung ist und zum Teil viel höher als 10 mm beschleunigt wurde, schließen die Autoren darauf, dass die Impulsübertragung nicht die Hauptursache für das Verblasen sein kann (SIGL et al. 2006).

Einen von dieser Argumentation abweichenden Ansatz wählen hingegen QI et al. (2006). Die Kraft F_{B} eines Elektronenstrahls mit Ladungsträgern von hoher Geschwindigkeit auf ein Pulverbett wird nach der folgenden Gl. (3) berechnet:

$$F_B = I_B \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m_0 \cdot U_A}{q}} \quad (3)$$

Hierbei sind I_B der Strahlstrom, m_0 die Ruhemasse eines Elektrons, U_A die Beschleunigungsspannung und q die Elementarladung. Unter der Annahme eines Pulverbetts mit gleich großen Partikeln sowie der Berücksichtigung von Haftreibung zwischen selbigen ergibt sich durch Umformung von Gl. (3) ein kritischer Strahlstrom I_k , dessen Überschreitung zum Pulververblasen führt (vgl. Gl. (4)).

$$I_K = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot d_B^2 \cdot (9 \cdot \mu - \sqrt{3}) \cdot \sqrt{q}}{6 \cdot (\sqrt{3} - 3 \cdot \mu) \cdot \sqrt{2 \cdot m_0 \cdot U_A}} \cdot d_P \quad (4)$$

Dabei stehen π für die Kreiszahl, ρ für die Dichte des Pulvers, g für die Erdbeschleunigung, d_B für den Strahldurchmesser und μ für den Haftreibungskoeffizienten zwischen zwei Partikeln. In Gl. (4) setzen Qi et al. (2006) die Werte $d_B = 0,2$ mm, $U_A = 50$ kV, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $g = 9,8$ m/s², $\rho = 7,893$ kg/m³ und $\mu = \tan(24^\circ)$ ein. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Partikeldurchmesser d_P und dem kritischen Strahlstrom I_k . Die analytischen Werte für I_k werden in der Folge mit experimentellen Untersuchungen abgeglichen. Dabei stellen die Autoren aufgrund der Übereinstimmung von Berechnung und Versuchen fest, dass die von den Strahlelektronen ausgehende Impulskraft der ausschlaggebende Effekt für das Pulververblasen ist (Qi et al. 2006).

Zusammenfassend ergibt sich für die Bedeutung der Impulsübertragung im Hinblick auf das Pulververblasen ein uneinheitlicher Stand der Erkenntnisse. Einerseits kommen SIGL et al. (2006) zu dem Ergebnis, dass die Impulskraft nicht die alleinige Ursache für das Verblasen sein kann. Andererseits belegen die Ergebnisse von Qi et al. (2006), dass der Impulskraft eine wesentliche Bedeutung zukommt. Die unterschiedlichen Berechnungsmethodiken sowie voneinander abweichende Prozessparametereinstellungen, wie beispielsweise bei der Beschleunigungsspannung, erschweren eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse. Als Fazit muss daher gelten, dass ein signifikanter Beitrag der Impulsübertragung bezüglich des Pulververblasens auf Basis der bisherigen Erkenntnisse nicht ausgeschlossen werden kann. Aus diesem Grund wird der Einfluss der Impulsübertragung zwischen Elektronenstrahl und Pulverbett im Verlauf der vorliegenden Arbeit weiterhin untersucht.

Neben der Impulsübertragung wurde in der Literatur auch die Bedeutung von thermodynamischen Effekten für das Pulververblasen untersucht. Die entsprechenden Ergebnisse spiegelt der folgende Absatz wider.

Thermodynamik

Trotz der Vakuumatmosphäre in der Bearbeitungskammer kann sich Luftfeuchtigkeit in den Zwischenräumen der Pulverschüttung absetzen. Es wurde vermutet, dass das Erhit-

zen mittels Elektronenstrahl die plötzliche Ausdehnung möglicher Wassereinschlüsse und somit eine explosionsartige Beschleunigung der Partikel verursacht. Bei Vergleichsversuchen von SIGL et al. (2006) mit einem 2 kW-Laserstrahl an Atmosphärendruck wurde das Pulververblasen nicht beobachtet. Aus diesem Grund schließen die Autoren eine maßgebliche Bedeutung thermodynamischer Effekte im Hinblick auf das unerwünschte Phänomen aus (SIGL et al. 2006). Für die vorliegende Arbeit werden thermodynamische Ursachen daher nicht weiter untersucht.

Die bisher diskutierten möglichen Erklärungsmodelle werden im Folgenden um die Ansätze der Elektrostatik sowie der Elektrodynamik ergänzt. Es schließt sich eine Schlussfolgerung an, deren Ziel es ist, die bisherigen Maßnahmen zur Vermeidung des Pulververblasens zusammenzufassen.

Elektrostatik

Die elektrostatische Aufladung der Pulverpartikel stellt nach ESCHEY et al. (2009) die dominierende Ursache für das Verblasen dar. Diesem Erklärungsansatz liegt zugrunde, dass sich Pulverpartikel gleichpolig aufladen, weil die vom Strahl eingebrachten Elektronen aufgrund des hohen elektrischen Widerstands des Pulvers nur sehr begrenzt abfließen können. Zur Abschätzung der auftretenden Abstoßungswirkung wird die Coulombkraft zwischen zwei geladenen Teilchen herangezogen. Es wird angenommen, dass der Elektronenstrahl entsprechend Abbildung 9 auf das Pulverbett einwirkt. Es gilt nach KAHNERT et al. (2007) für die transportierte Ladung Q_B :

$$\Delta Q_B = I_B \cdot \Delta t_B \quad (5)$$

Hierin ist $\Delta t_B = 0,005$ s die Bestrahlungsdauer und $I_B = 1,000$ mA ist der Strahlstrom. Nach Gl. (5) ergibt sich daraus die durch den Elektronenstrahl transportierte Ladung in Höhe von $\Delta Q_B = 0,005$ mC. Während der Bestrahlung wird diese elektrische Ladung auf das Pulverbett übertragen und führt nach o. g. Zeitspanne zur Bewegung aller Pulverpartikel im Umkreis von $d_{PV} = 10$ mm des Strahlaufftreffbereichs (vgl. Abbildung 9, Bild B). Die Anzahl A_P der bis zu diesem Zeitpunkt vom Strahl beaufschlagten Partikel mit einem identischen Durchmesser von $d_P = 30$ μ m lässt sich daher nach folgender Formel abschätzen:

$$A_P = \frac{\left(\frac{d_{PV}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot t_S}{\frac{1}{6} \cdot d_P^3 \cdot \pi} = \frac{3 \cdot d_{PV}^2 \cdot t_S}{2 \cdot d_P^3} \quad (6)$$

Nach Gl. (6) folgt für eine Pulverschichthöhe von $t_S = 1$ mm (vgl. Abschnitt 1.4.2), dass die Strahlladung ΔQ_B bereits an $A_P = 556 \cdot 10^3$ Pulverteilchen übergegangen ist. Daraus folgt für die elektrische Ladung eines einzelnen Pulverpartikels:

$$Q_P = \frac{\Delta Q_B}{A_P} \quad (7)$$

Aus Gl. (7) resultiert für Q_P ein Wert von $9,00 \cdot 10^{-12}$ C. Unter der Annahme, dass zwei benachbarte Pulverpartikel die identische maximale Ladung besitzen, kann die abstoßende Kraft F wie folgt berechnet werden (vgl. Gl. (8); SIGL et al. 2006):

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_P^2}{d_P^2} \quad (8)$$

Die Variable ε_0 in o. g. Formel bezeichnet die elektrische Feldkonstante mit dem Wert $8,85 \cdot 10^{-12}$ C/(Vm) (STÖCKER 2007). Der in Gl. (8) berechnete Wert von $8,09 \cdot 10^{-4}$ N ist um ein Vielfaches größer als die Gewichtskraft eines Pulverpartikels in Höhe von $1,09 \cdot 10^{-12}$ N. Aus diesem Grund folgern ESCHEY et al. (2009), dass die elektrostatische Aufladung eine der Hauptursachen für das Pulververblasen darstellt. Zusätzlich wird damit die schnelle Ausbreitung des Effektes erklärt (vgl. Abbildung 9, Bild C). Sobald das Pulver im Strahlaufftreffbereich verblasen ist, werden die eingebrachten Elektronen in die Grundplatte abgegeben und laden die umliegenden Pulverpartikel erneut auf und der beschriebene Effekt pflanzt sich fort (SIGL 2008).

Analog zu den o. g. Autoren gehen auch QI et al. (2006) davon aus, dass auf die Pulverpartikel durch Beaufschlagung mit dem Strahl eine Coulombkraft nach Gl. (8) wirkt. Die Ladung eines Partikels Q_P wird von ihnen nach Gl. (9) berechnet:

$$Q_P = \frac{3}{4} \cdot d_P^2 \cdot E \cdot (\pi \cdot C \cdot n_e \cdot q \cdot \Delta t_A) \quad (9)$$

Hierin entspricht d_P wiederum dem Durchmesser eines Pulverteilchens, E ist die Intensität des elektrischen Feldes, C der Geschwindigkeitsgradient eines Elektrons, n_e die Anzahl der Elektronen pro Volumeneinheit, q die Elementarladung und Δt_A die Dauer des Aufladevorgangs. Durch Einsetzen von Gl. (9) in Gl. (8) ergibt sich nach QI et al. (2006) die abstoßend wirkende Coulombkraft F_C :

$$F_C = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(\frac{3 \cdot d_P \cdot E \cdot \pi \cdot C \cdot n_e \cdot q \cdot \Delta t_A}{4} \right)^2 \quad (10)$$

Für die Werte $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ C/(Vm), $d_P = 0,03$ mm, $E = 100.000$ V/m, $q = 1,90 \cdot 10^{-19}$ C und $\Delta t_A = 0,005$ s sowie die abgeschätzten Größen $n_e = 1,70 \cdot 10^{14}$ m⁻³ bzw. $C = 2,10 \cdot 10^{-4}$ m²/(Vs) resultiert aus Gl. (10) die Coulombkraft $F_C = 5,17 \cdot 10^{-10}$ N. Dieser Betrag ist einerseits geringer als die von SIGL et al. (2006) nach Gl. (8) mit den identischen Eingangswerten berechnete Coulombkraft. Andererseits ist dieser Wert ungefähr um den Faktor 500 größer als die Gewichtskraft der betrachteten Pulverpartikel mit dem Radius $r_P = 0,03$ mm, d. h. $1,09 \cdot 10^{-12}$ N. Demnach kommen auch infolge der Berech-

nungsmethodik nach QI et al. (2006) elektrostatische Kräfte als mögliche Ursache für das Pulververblasen in Betracht.

Elektrodynamik

Nach KAHNERT et al. (2007) wird der elektrostatische Prozess von elektrodynamischen Mechanismen überlagert, die Kraftwirkungen auf die Pulverpartikel verursachen können. Elektrodynamische Effekte basieren darauf, dass bewegte Ladungsträger, wie beispielsweise die Elektronen eines Elektronenstrahls, elektromagnetische Felder erzeugen. Als Ersatzmodell für den Elektronenstrahl dient ein Strom führender Leiter mit dem Außenradius R_A , um den sich in Abhängigkeit vom Abstand r ($r > R_A$) von seiner Mittelechse ein Magnetfeld der Stärke H nach folgender Gleichung ausbildet (KAHNERT et al. 2007):

$$H(r) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (11)$$

In dieser Gleichung bezeichnet I den durch den Leiter fließenden Strom. Die Größe r wird nun gleich dem Radius des Strahlauftreffbereichs r_B und I gleich dem Strahlstrom I_B gesetzt. Der Betrag des Magnetfelds unterliegt einer rotationssymmetrischen Verteilung, wobei für r_B der Maximalwert erreicht wird. Analog zu den vorangehenden Erklärungsansätzen sowie entsprechend Abbildung 9 wird der Strahlstrom $I_B = 1$ mA gewählt und als gleichverteilt über dem Querschnitt angenommen. Unter diesen Bedingungen gilt mit Gl. (11) für die magnetische Flussdichte im Vakuum:

$$B(r = r_B) = \mu_0 \cdot H(r_B) = \frac{\mu_0 \cdot I_B}{2 \cdot \pi \cdot r_B} \quad (12)$$

Aus Gl. (12) folgt mit μ_0 als magnetischer Feldkonstante mit dem Betrag $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am), dass $B = 2$ μ T beträgt. Durch das so entstandene Magnetfeld wird auf ein bewegtes und mit Q_P elektrisch geladenes Teilchen die Lorentzkraft ausgeübt (STÖCKER 2007). Nach Gl. (13) resultiert dieser Kraftbetrag aus einer von den Autoren geschätzten Partikelgeschwindigkeit $v_P = 10$ m/s, einer Ladung $Q_P = 9,00 \cdot 10^{-12}$ C (s. o.) und der magnetischen Flussdichte $\{B\}$ (KAHNERT et al. 2007):

$$\{F_L\} = Q_P \cdot (\{v_P\} \times \{B\}) \quad (13)$$

Der Kraftbetrag nach Gl. (13) beträgt mit den o. g. Werten für Q_P , I_B und r_B $F_L = 1,80 \cdot 10^{-16}$ N und ist damit um mehrere Größenordnungen geringer als die o. g. Gewichtskraft eines Partikels in Höhe von $1,09 \cdot 10^{-12}$ N. Eine durch die Lorentzkraft verursachte signifikante Beschleunigungswirkung auf die bereits verblasenen Pulverteilchen kann daher nach der Berechnungsmethodik von KAHNERT et al. (2007) ausgeschlossen werden. Folglich ist der Einfluss elektrodynamischer Mechanismen äußerst gering und wird im Rahmen der Arbeit vernachlässigt.

Zusammenfassung der physikalischen Effekte

Verschiedene Vorarbeiten widmen sich der Untersuchung physikalischer Effekte in Bezug auf das Fehlerbild Pulververblasen. Dabei werden Hypothesen der Impulsübertragung, der Thermodynamik, der Elektrostatik sowie der Elektrodynamik evaluiert. Übereinstimmend zeigen die Erkenntnisse, dass thermodynamische sowie elektrodynamische Effekte ausgeschlossen werden können (vgl. SIGL et al. 2006 bzw. KAHNERT et al. 2007). Demgegenüber zeigen zwei verschiedene Quellen, dass die elektrostatische Abstoßung allerdings relevant im Hinblick auf das Pulververblasen ist (QI et al. 2006; SIGL et al. 2006; KAHNERT et al. 2007; ESCHEY et al. 2009).

Überdies stellen QI et al. (2006) fest, dass der Impulsübertragung zwischen den bewegten Ladungsträgern eines Elektronenstrahls und dem Pulverbett eine wesentliche Bedeutung zukommt. Obwohl SIGL et al. (2006) diesen Effekt im Rahmen ihrer analytischen Untersuchungen nicht bestätigen können, kann seine Relevanz auf der Basis der vorgestellten Vorarbeiten nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund findet die Impulsübertragung Eingang in die weitere Modellierung.

Im Folgenden werden Maßnahmen zur Vermeidung des Pulververblasens vorgestellt, die in der Literatur beschrieben werden.

2.2.3 Erkenntnisse zur Vermeidung des Pulververblasens

Von SIGL et al. (2006) werden die in Abbildung 15 aufgeführten Maßnahmen zur Vermeidung des Verblasens vorgeschlagen und ihre Wirksamkeit abgeschätzt.

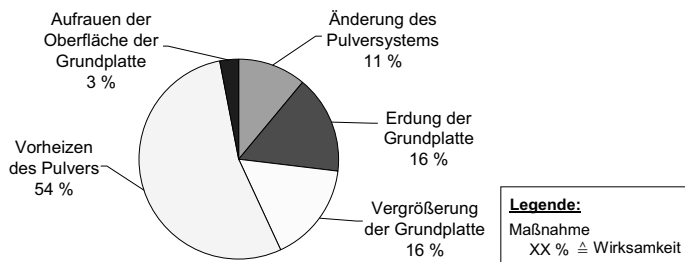


Abbildung 15: Bewertung der Wirksamkeit verschiedener Maßnahmen zur Vermeidung des Pulververblasens (SIGL et al. 2006)

Die größte Wirkung zur Reduzierung des Verblasens besitzt nach SIGL et al. (2006) eine angepasste Temperaturführung durch Vorheizen der Pulverschicht. Dabei findet eine Reduktion der Grenzflächenenergie als Vorstadium zum Sinterprozess statt, durch die eine partielle Versinterung benachbarter Pulverpartikel entsteht (GERMAN 1996). Als

Ergebnis kann die eingebrachte Ladung besser an die Erdung der Grundplatte abgegeben werden. Ab einer Pulvertemperatur von ca. 800 °C ist bei Warmarbeitsstahl 1.2343 eine Beaufschlagung des Pulvers mit einem fokussierten Elektronenstrahl ohne Pulververblasen möglich. Diese Maßnahme beeinflusst allerdings die weitere Prozessführung des Elektronenstrahlschmelzens, da der Verfestigungsschritt bei höheren Temperaturen abläuft.

SIGL et al. (2006) konnten darüber hinaus aufzeigen, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit des untersuchten Phänomens umso geringer ist, je größer die Grundplatte wird. Wie bereits erwähnt, verfügen Pulversysteme über unterschiedliche Ausprägungen und damit über verschiedene elektrische Leitfähigkeiten (CAPUS 2000). Daher ist eine angepasste Partikelform (vgl. Abbildung 16) besonders relevant, um ein Verblasen zu vermeiden. Mit spratzigen, d. h. länglichen bzw. ungleichmäßig geformten Partikeln konnte, beispielsweise im Vergleich zu kugeligen Formen, die Wahrscheinlichkeit des Pulververblasens reduziert werden (SIGL et al. 2006).

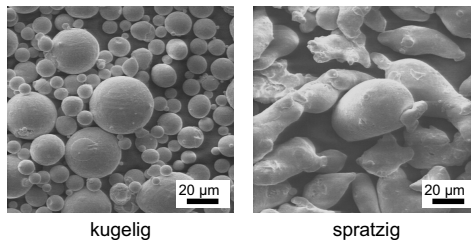


Abbildung 16: Ausgewählte Pulverpartikelformen: kugelig (links) und spratzig (rechts)

Einen geringen Anteil der Wirksamkeit besitzt hingegen eine erhöhte Rauheit der Grundplatte. Vergleichsversuche mit maschinell gedrehten Grundplatten haben gezeigt, dass nur begrenzt mehr Leistung ohne Verblasen in die Pulverschicht eingebracht werden kann, wenn die Partikel auf einer mittels Schruppfeile aufgerauten Oberfläche liegen und damit größere Kontaktbereiche zur Grundplatte entstehen (SIGL et al. 2006).

Zusammenfassend sind weder die Modellvorstellungen zu den genannten physikalischen Effekten noch die Änderungen der Prozessführung, die darauf basierend entwickelt wurden, als ausreichend zu bewerten. Zum einen fehlt ein ganzheitliches Verständnis für die ablaufenden Prozesse, das die als relevant identifizierten Hypothesen zusammenfasst. Zum anderen wurde der Einfluss von Prozessgrößen nicht vollständig bestimmt, d. h. eine gezielte Beeinflussung des Pulververblasens findet derzeit nicht statt. Wie bereits beschrieben, umfasst das Kapitel 2 neben den Vorarbeiten im Hinblick auf das Fehlerbild *Pulververblasen* ebenso die bisherigen Erkenntnisse in Bezug auf die *Schmelztropfenbildung* und die *Schichtablösung*. Der Wissensstand zu den beiden letztgenannten Fehlerbildern wird im Folgenden näher erläutert.

2.3 Schmelztropfenbildung

2.3.1 Allgemeines

Während die bisherigen Erklärungsansätze in Bezug auf das Pulververblasen ausschließlich für die Anwendung beim Elektronenstrahlschmelzen entwickelt wurden, sind *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* bereits aus dem Bereich der laserstrahlbasierten generativen Fertigung bekannt. Im Gegensatz dazu existieren für das Elektronenstrahlschmelzen keine Veröffentlichungen, die die beiden letztgenannten Fehlerbilder vollständig adressieren. Aus diesem Grund liegt der Ansatz nahe, die bisherigen Publikationen im Bereich des Laserstrahlschmelzens zu untersuchen, die darin enthaltenen Erklärungsansätze aufzunehmen und die beschriebenen Maßnahmen im Hinblick auf ihre Eignung zur Eliminierung der Fehlerbilder beim Elektronenstrahlschmelzen zu überprüfen. Hierfür werden bisher bekannte Prozessbedingungen, für die ein positives Prozessergebnis zu erwarten ist, auf die EB-basierte generative Fertigung übertragen und mittels Simulation werden spezifische Prozessparameter abgeleitet. Durch die sich anschließende Validierung und durch Versuchsreihen wird die Gültigkeit der Hypothesen überprüft.

2.3.2 Erklärungsansatz

Das Auftreten von Schmelztropfen zeugt von einer unzureichenden Benetzung des aufgeschmolzenen Materials mit der vorangehenden Schicht. Als treibende Kraft ist hierbei die Oberflächenspannung der Schmelze zu sehen, die dazu führt, dass sich kugelförmige Körper bilden (HERMAN 1981). Abbildung 17 zeigt hierzu ein Gedankenmodell nach YOUNG (1805).

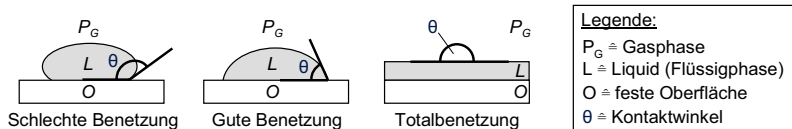


Abbildung 17: Abhängigkeit des Benetzungsverhaltens vom Kontaktwinkel θ zwischen Flüssigkeit L und fester Oberfläche O nach YOUNG (1805)

Eine ideal flache, perfekt ebene und chemisch homogene feste Oberfläche O steht unter Anwesenheit einer Gasphase P_G in Kontakt mit einer chemisch nicht reaktiven Flüssigkeit L. Bedeckt die Flüssigkeit nicht die gesamte Oberfläche (Totalbenetzung), so stehen die Oberflächen L und O unter dem Kontaktwinkel θ zueinander. Dieser ergibt sich aus dem Minimum der totalen freien Energie des Systems und ist eine Kenngröße für das Benetzungsverhalten der Flüssigkeit L (EUSTATHOPOULOS et al. 1999). Wie

Abbildung 17 zu entnehmen ist, herrscht bei großen Kontaktwinkeln zwischen Schmelze und Festkörper ein schlechtes Benetzungsverhalten vor (MUMTAZ et al. 2006). Der Wert Θ berechnet sich nach YOUNG (1805) entsprechend Gl. (14):

$$\Theta = \arccos\left(\frac{\sigma_O - \sigma_{LO}}{\sigma_L}\right) \quad (14)$$

Hierin bezeichnen σ_O die freie Oberflächenenergie des Festkörpers O, σ_{LO} die Grenzflächenenergie zwischen L und O sowie σ_L die Oberflächenspannung der Flüssigkeit L. Wie in Abbildung 18 (links) dargestellt, lässt sich die Geometrie des von der bewegten Energiequelle erzeugten Schmelzbads durch einen Halbzylinder annähern (KRUTH et al. 2004).

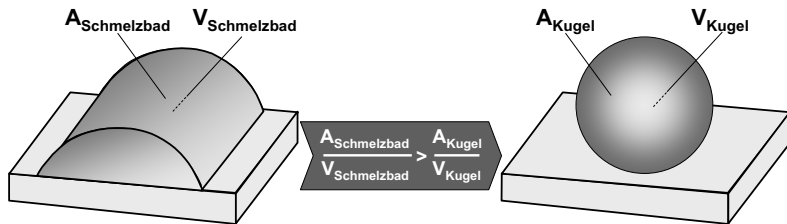


Abbildung 18: Kriterium für die Instabilität des Schmelzbades (KRUTH et al. 2004)

Sobald die Gesamtoberfläche des Schmelzbads $A_{\text{Schmelzbad}}$ diejenige einer Kugel des gleichen Volumens V_{Kugel} übersteigt, so ist von Schmelztropfenbildung auszugehen. Um diesen Effekt zu vermeiden, muss das Verhältnis von Länge zu Breite des Schmelzbads möglichst gering sein. Die Angabe eines exakten Wertes für diesen Quotienten erfordert die Kenntnis des Kontaktwinkels Θ zwischen dem Feststoff und der Schmelze eines Werkstoffsystems. Die Bestimmung dieses Winkels ist äußerst komplex. Er hängt neben den Legierungsbestandteilen auch vom tatsächlichen Oxidgehalt der Pulverpartikel und der Grundplatte bzw. der darunterliegenden Schicht ab (KYOGOKU et al. 2003).

Eine weitere Bedingung zur Vermeidung von Schmelztropfenbildung ist eine möglichst große Schmelzbadbreite an der Kontaktfläche zwischen der obersten und der darunterliegenden verfestigten Schicht (GUSAROV et al. 2007). Die durchgeführten Einspurschmelzversuche bei der laserstrahlbasierten generativen Fertigung zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit des Ablösens von Schmelztropfen mit steigender Scangeschwindigkeit v_s zunimmt (vgl. Abbildung 19).

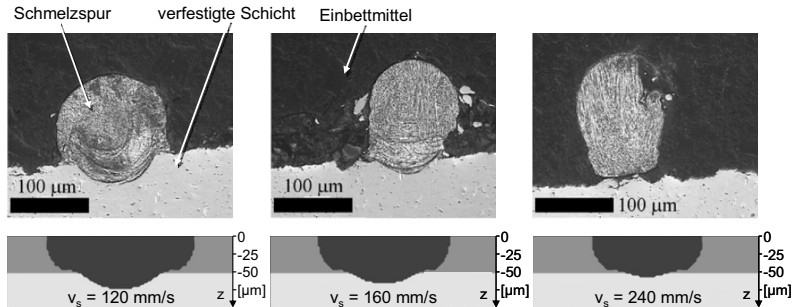


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der Ablösung von Schmelztropfen und der Breite der metallurgischen Anbindung an eine darunterliegende verfestigte Schicht beim Laserstrahlschmelzen nach GUSAROV et al. (2007)

Zusätzlich sind im unteren Bereich von Abbildung 19 die berechneten Schmelzbadquerschnitte den jeweiligen Scangeschwindigkeiten zugeordnet. Bei einem Vergleich mit den darüber angeordneten Mikroskopaufnahmen des Querschliffs zeigt sich, dass mit steigenden Werten von v_s die Breite der Schmelzspuren an der Schnittstelle zur darunterliegenden verfestigten Schicht bei $z = -50 \mu\text{m}$ abnimmt. Je schmaler die metallurgische Anbindung des aufgeschmolzenen Materials ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Schmelzbad dazu neigt, sich von der unteren Schicht abzulösen und in der Folge in einzelne Tropfen aufzubrechen (GUSAROV et al. 2007).

2.3.3 Erkenntnisse zur Vermeidung der Schmelztropfenbildung

Neben den o. g. Faktoren Legierungszusammensetzung sowie Oxidanteil von Pulver, Grundplatte und Schicht existieren noch weitere Möglichkeiten, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Schmelztropfenbildung zu reduzieren. Ein Ansatz ist beispielsweise, in den eigentlichen Standardwerkstoff niedrigschmelzende Komponenten einzubringen, um bei der Einwirkung des Strahls das Pulver nicht vollständig aufzuschmelzen. Damit wird das vorhandene Schmelzbad durch das Vorhandensein fester Legierungsbestandteile stabilisiert und tendiert nicht dazu, in einzelne Tropfen aufzubrechen (KRUTH et al. 2004). Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung möglichst dünner Pulverschichten (HAUSER et al. 2005). Aufgrund der größeren Anzahl an notwendigen Schichten folgt daraus jedoch gleichzeitig eine wesentliche Steigerung der benötigten Baujobdauer. Darüber hinaus berichten KRUTH et al. (2004), dass die Schmelztropfenbildung beim Laserstrahlschmelzen reduziert werden kann, wenn der Laser anstatt im kontinuierlichen Betrieb im gepulsten Modus betrieben wird. Für positive Ergebnisse muss hierfür ein Strahlstrom zwischen 42 A und 52 A bei einer Frequenz von über ca. 25 Hz eingestellt werden.

Für das Laserstrahlschmelzen mit kontinuierlicher Strahlleistung zeigt Abbildung 20 ein experimentell bestimmtes Prozessfenster in Abhängigkeit der Strahlleistung P_L und der Scangeschwindigkeit v_s (KRUTH et al. 2004).

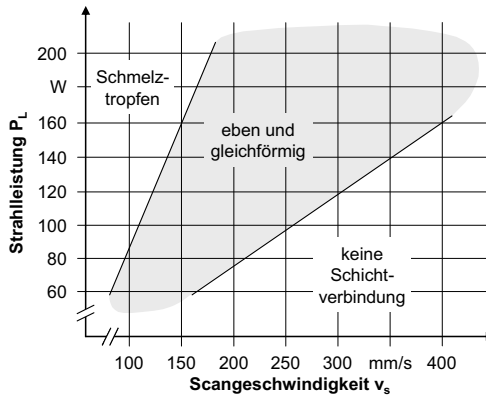


Abbildung 20: Prozessfenster für das Laserstrahlschmelzen (KRUTH et al. 2004)

Das Diagramm ist gültig für eine Pulverschichthöhe von $t_s = 0,25$ mm und einen Abstand der Strahlbahnen von $h = 0,1$ mm bei einem Stahlleckdurchmesser von $d_B = 0,8$ mm. Damit zeigt sich, dass Schmelztropfenbildung umso wahrscheinlicher auftritt, je größer der Quotient P_L/v_s ist. Werden jedoch hohe Strahlleistungen und hohe Scangeschwindigkeiten zugleich gewählt und verbleibt das Verhältnis aus P_L und v_s konstant bei einem nicht näher spezifizierten Wert, so folgt eine ebene und gleichförmige Schichtverfestigung (HAUSER et al. 2004).

Aus höheren Strahlleistungen resultieren bei gleichbleibender Scangeschwindigkeit höhere Spitzentemperaturen im Schmelzbad, womit das Auftreten von Schmelztropfen minimiert werden kann. Dementsprechend resultiert aus einem kleinen Quotienten P_L/v_s , dass vermehrt Schichtablösung zu beobachten ist (KRUTH et al. 2005). Weitere Autoren berichten hingegen, dass Schmelztropfenbildung vermieden wird, wenn geringe Scangeschwindigkeiten und niedrige Strahlleistungen zugleich eingestellt sind. Beispielsweise konnten positive Ergebnisse auch dann erzielt werden, wenn v_s zwischen 1 mm/s und 50 mm/s beträgt (KLOCKE & WAGNER 2003).

2.3.4 Schlussfolgerungen für das Elektronenstrahlschmelzen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Entstehungsmechanismen der Schmelztropfenbildung weitestgehend geklärt sind. Die vorgestellten Gegenmaßnahmen für den Laserstrahlbereich sind jedoch nur eingeschränkt auf das Elektronenstrahlschmelzen

übertragbar. Da bei der elektronenstrahlbasierten generativen Fertigung ausschließlich genormte Standard-Pulverwerkstoffe zum Einsatz kommen, ist sowohl ein Zulegieren mit weiteren Elementen, wie beispielsweise Phosphor, zur Senkung des Schmelzpunkts sowie der Oberflächenspannung der Schmelze (KRUTH et al. 2004) als auch die Verwendung eines Zwei-Komponenten-Werkstoffsystems mit niedrig- und hochschmelzenden Bestandteilen ausgeschlossen. Aufgrund der Tatsache, dass bei dem verwendeten EB-Demonstrator ein Strahlpulsen im beschriebenen Frequenzbereich aus anlagentechnischen Gründen ausgeschlossen ist, wird der Elektronenstrahl kontinuierlich betrieben.

Das o. g. Prozessfenster (vgl. Abbildung 20) kann nicht unmittelbar auf das Elektronenstrahlschmelzen übertragen werden, da sich vor allem die Energiequellen hinsichtlich ihres physikalischen Prinzips und daher auch in Bezug auf die meisten Strahlkennwerte unterscheiden. Jedoch wird im Weiteren davon ausgegangen, dass bei der elektronenstrahlbasierten generativen Fertigung prinzipiell identische werkstoffkundliche Vorgänge ablaufen, d. h. das Verfestigungsverhalten der Schmelze wird unabhängig von der eingesetzten Strahlquelle angenommen. Als Grundbedingung zur Vermeidung von Schmelztropfen müssen im Elektronenstrahlbereich folglich die Prozessparameter so angepasst werden, dass ein möglichst geringes Verhältnis aus Länge zu Breite des Schmelzbads resultiert. Gleichzeitig muss ein schmaler Anbindungsbereich auf der Unterseite der Schmelzspur vermieden werden.

Beim Elektronenstrahlschmelzen resultiert die Temperaturverteilung primär von Wärmeleitungsvorgängen durch die Bewegung der Strahlquelle relativ zur Pulverschicht. Der Vergleich mit weiteren strahlbasierten Verfahren, wie beispielsweise dem Wärmeleitungsschweißen, zeigt jedoch, dass überdies Konvektionseffekte im Schmelzbad auftreten und dadurch der Energietransport beeinflusst wird. Diese Strömungsvorgänge können verschiedene Ursachen besitzen, u. a. elektromagnetische Kräfte, resultierende Kräfte aus der Oberflächenspannung σ_L , durch Schutzgas oder Plasmastrahl einwirkende Kräfte, Auftriebskräfte oder Impulskräfte eindringender Schweißspritzer. Im Allgemeinen ist jedoch die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung, welche zum Auftreten des Marangoni-Effektes führt, die dominierende Ursache (RADAJ 1992).

Da die Temperaturverteilung an der Oberfläche des Schmelzbades nach außen hin abnimmt, stellen sich ortsabhängige Werte für σ_L ein. Je nachdem, ob die Oberflächenspannung der Schmelze mit steigender Temperatur zu- oder abnimmt, resultieren unterschiedliche Strömungsrichtungen (RADAJ 1992). Ist $\partial\sigma_L/\partial T$ negativ, ergibt sich an der Oberfläche eine Strömung von der Schweißbadmitte (hohe Temperatur) zum Rand (niedrige Temperatur). Für den Fall eines positiven Vorzeichens von $\partial\sigma_L/\partial T$ kehrt sich die Strömung um. Die Strömungsrichtung im Schmelzbad hat wiederum Auswirkungen auf die Querschnittsgeometrie der Schweißnaht. Ist $\partial\sigma_L/\partial T$ negativ, so wird die heiße Schmelze zum Schmelzbadrand transportiert, wodurch breite und flache Nähte entstehen. Ein positives $\partial\sigma_L/\partial T$ des Werkstoffs bewirkt eine Oberflächenströmung vom Rand

zur Mitte und damit auch den Transport der heißen Schmelze von der Oberfläche zur Nahtwurzel, wodurch die Naht tief und schlank ausgebildet wird (KVASNA et al. 2003).

Neuere Untersuchungen im Bereich des Laserstrahlschmelzens (u. a. DAVIS et al. 2009; GUSAROV et al. 2007; YASA et al. 2009) zeigen, dass die Mechanismen der Wärmeleitung im Gegensatz zu Strömungseffekten als dominierend für die Temperaturverteilung in der Prozesszone und damit im Hinblick auf die Stabilität der Pulververfestigung, d. h. die Vermeidung von Schmelztropfen, zu erachten sind. Beispielsweise berechneten GUSAROV et al. (2007) die Breite eines Schmelzbades aus 1.4404 auf der Basis von Wärmeleitung und Verlustenergien durch Wärmestrahlung und verglichen die Ergebnisse mit den o. g. Einspurschmelzversuchen (vgl. Abbildung 19). Die Auswertung zeigt, dass die Strömung des verflüssigten Metalls in der vorderen Hälfte des Schmelzbades, d. h. im Bereich der maximalen Breite, besonders schwach ist. Im hinteren Bereich des Schmelzbades nehmen die Konvektionseffekte zu, beeinflussen damit allerdings nicht mehr die Berechnung der maximalen Schmelzbadbreite. GUSAROV et al. (2007) heben im Allgemeinen die gute Übereinstimmung von Simulation und Experimenten hervor und kommen zu dem Ergebnis, dass Strömungseffekte für die Berechnung von Schmelztropfenbildung irrelevant sind.

Die vorliegende Arbeit baut auf diesen Ergebnissen auf, da für die experimentellen Untersuchungen ebenfalls der Pulverwerkstoff 1.4404 verwendet wurde. Da die beschriebenen Abläufe aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung primär werkstoffgetrieben sind, wird von einer Übertragbarkeit der o. g. Ergebnisse ausgegangen. Aus diesem Grund werden Strömungseffekte im weiteren Verlauf der Arbeit vernachlässigt. Vielmehr wird ein Prozessmodell unter Berücksichtigung von Wärmeleitung und Wärmestrahlung analytisch formuliert und numerisch gelöst.

Bisher standen die Fehlerbilder Pulververblasen und Schmelztropfenbildung im Mittelpunkt der Betrachtungen. Der folgende Abschnitt 2.4 behandelt die Ergebnisse hinsichtlich der Schichtablösung, des dritten innerhalb dieser Arbeit zu eliminierenden Fehlerbildes des Elektronenstrahlschmelzens.

2.4 Schichtablösung

2.4.1 Allgemeines

Für die Schichtablösung liegt der Betrachtungsfokus der Arbeit darauf, die bisherigen Erkenntnisse aus der Entwicklung des Strahlschmelzens, unabhängig von der eingesetzten Strahlquelle, zur Minimierung der Auftretenswahrscheinlichkeit dieses Fehlerbildes zu nutzen. Wie im Folgenden gezeigt wird, müssen die Strahlparameter zur Vermeidung

der Schichtablösung angepasst gewählt werden. Dies bedeutet im Speziellen, dass die Pulverschicht bei der Beaufschlagung mit der Strahlquelle derart aufgeschmolzen werden muss, dass beim darauffolgenden Abkühlen eine belastbare Schichtverbindung zu dem darunterliegenden bzw. dem bereits verfestigten Material entsteht. Dies wird durch die Modellierung und Simulation des Temperaturfelds beim Elektronenstrahlschmelzen erreicht, indem geeignete Standard-Scannuster (s. u.) als Grundlage der Berechnungen verwendet werden.

2.4.2 Erklärungsansatz

Die dominierende Ursache für das Auftreten von Schichtablösung beim Elektronenstrahlschmelzen (vgl. Abbildung 11) ist eine mangelnde Verbindung der Mikrostruktur von aufeinanderfolgenden Feststoffschichten (KAHNERT et al. 2007). Durch die punktuelle Energieeinbringung bei der strahlbasierten generativen Fertigung entstehen hohe Temperaturgradienten, die während des Abkühlprozesses zu Eigenspannungen im verfestigten Material führen. Bei einem Bauteil ohne Schichtablösung stehen die inneren Spannungen im Gleichgewicht mit den Spannungen, die durch die Verformung desselben entstehen. Sobald die Eigenspannungen die Verformungsfähigkeit eines fehlerbehafteten Bauteils übersteigen, lösen sich entweder eine Schicht oder mehrere Schichten ab (MERCCELIS & KRUTH 2005).

Eigenspannungen im Bauteil führen nicht nur zu Schichtablösung sowie zu unerwünschten Deformationen und damit zu Abweichungen von der Sollgeometrie. Gegenüber Bauteilen ohne Eigenspannungen reduzieren sie auch die Widerstandsfähigkeit bei der Beaufschlagung mit äußeren Lasten, da sich Eigenspannungen im Werkstück sowie Spannungen aufgrund externer Lasten addieren können. Dies führt u. U. zu einem vorzeitigen Bauteilversagen (WITHERS & BHADSHIA 2001).

Im Allgemeinen werden Eigenspannungen in drei Kategorien eingeteilt. In dieser Arbeit wird lediglich auf Eigenspannungen des Typs I eingegangen, welche sich über die gesamten Abmessungen eines Bauteils erstrecken. Eigenspannungen vom Typ II und III, die aufgrund unterschiedlicher Materialgefüge und Gitterfehler auf atomarer Ebene resultieren, bleiben hier unberücksichtigt, da sie von vernachlässigbarer Bedeutung für die makroskopische Festigkeit des Werkstücks sind (WITHERS & BHADSHIA 2001).

Das Entstehen von Eigenspannungen ist beim Strahlschmelzen, wie beispielsweise auch beim Laserstrahlbiegen, auf den sog. Temperature Gradient Mechanism (TGM) zurückzuführen (vgl. u. a. HORNFECK 2008; MERKLEIN 2001). Aufgrund der Wärmedehnung ϵ_{th} der aufgeheizten Bereiche ergeben sich Druckspannungen und Verformungen im Material (siehe Abbildung 21).

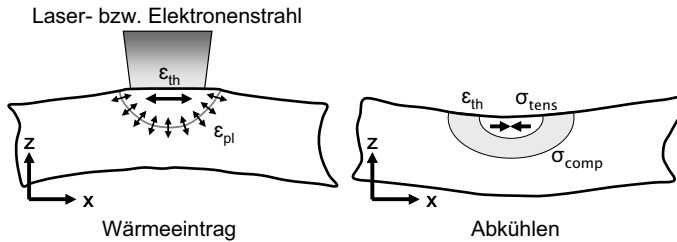


Abbildung 21: Entstehung von Eigenspannungen aufgrund des Temperature Gradient Mechanism (TGM) nach MERCELIS & KRUTH (2005)

Führen diese Druckspannungen zur Überschreitung der Dehngrenze des Materials, welche aufgrund der hohen Prozesstemperaturen beim Laser- bzw. Elektronenstrahlschmelzen stark herabgesetzt ist, verformen sich die betroffenen Bereiche entsprechend ϵ_{pl} plastisch. Die auf diese Weise verformten Bereiche kontrahieren sich während des anschließenden Abkühlprozesses durch den Rückgang der thermischen Dehnungen ϵ_{th} . Dementsprechend verkleinern sich die plastisch verformten oberen Schichten des Bauteils im Vergleich zu den darunterliegenden. Daraus folgt, dass sich das Material aufgrund der Zug- und Druckspannungen σ_{tens} bzw. σ_{comp} nach oben biegt. Da die unteren Schichten dieser Wölbung entgegenwirken, resultieren Eigenspannungen im Bauteil, die bei ungenügender Anbindung der Schichten untereinander zur Ablösung führen können (MERCELIS & KRUTH 2005).

2.4.3 Erkenntnisse zur Vermeidung der Schichtablösung

Aufgrund des Verfahrensprinzips des Strahlschmelzens kann zur Verfestigung beliebiger Bauteilquerschnitte auf die örtlich begrenzte Energieeinbringung nicht verzichtet werden. Aus diesem Grund werden Ansätze entwickelt, die erzeugten Eigenspannungen einerseits zu reduzieren und andererseits deren Auswirkungen auf die Schichtablösung durch eine Verbesserung der Schichtverbindung zu verhindern.

Eine Maßnahme zur Vermeidung hoher Eigenspannungen ist die Verwendung angepasster Scanstrategien (ZAEH et al. 2007). Dabei wird eine möglichst homogene Temperaturverteilung innerhalb der verfestigten Bereiche angestrebt, um die auftretenden Temperaturgradienten zu minimieren. Ein entsprechender Ansatz ist, den zu scannenden Bereich in eine Vielzahl kleiner Grundmuster, wie beispielsweise Quadrate, zu unterteilen, welche sequentiell nach dem Zufallsprinzip verfestigt werden (SCHUTZRECHT DE 10317822A1 2004; KRUTH et al. 2004). Eine darauf basierende Maßnahme schlagen KAHNERT et al. (2007) für das Elektronenstrahlschmelzen vor, indem sie, wie in Abbildung 22 verdeutlicht, die Orientierung der Scanvektoren zur Beaufschlagung der Grundmuster variieren.

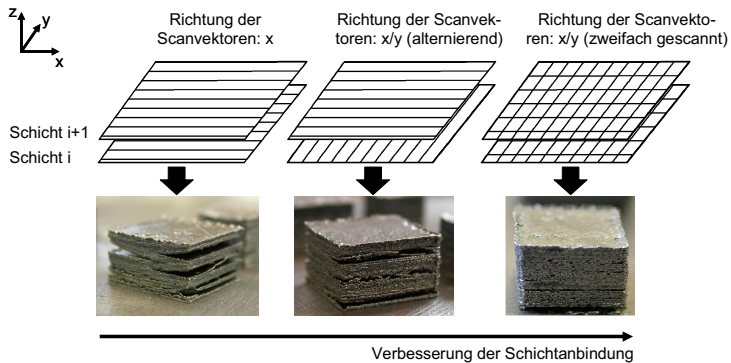


Abbildung 22: Verbesserung der Schichtverbindung in Abhängigkeit der Orientierung der Scanvektoren nach KAHNERT et al. (2007)

Die Untersuchungen zeigen zunächst, dass die einmalige Verfestigung der Pulverschicht unter Verwendung von Vektoren in x-Richtung zur Aufbiegung der Schicht am Anfang sowie am Ende der Scanstrecke führt. Wird die Orientierung der Scanvektoren zweier aufeinander folgender Schichten hingegen um 90° zueinander gedreht und auf diese Weise ein alternierender Ablauf umgesetzt, so ist eine bessere Anbindung der $i+1$ -ten an die i -te Schicht zu beobachten. Abschließend stellen KAHNERT et al. (2007) diese Ergebnisse mit der zweifachen Beaufschlagung eines Grundmusters sowohl in x- als auch in y-Richtung gegenüber. Mit der letztgenannten Variante wird im Vergleich zwar die beste Schichtanbindung erzielt (vgl. Abbildung 22), jedoch muss bei ansonsten identischen Scaneinstellungen für eine Schicht die doppelte Zeitspanne zur Verfestigung aufgewendet werden, da die Fläche zweimal mit dem Strahl beaufschlagt wird.

2.4.4 Schlussfolgerungen für das Elektronenstrahlschmelzen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zur Verbesserung der Schichtanbindung zum einen kleine Grundmuster zu wählen sind und zum anderen unidirektionale Scanvektoren in aufeinander folgenden Schichten vermieden werden müssen. Das mehrmalige Scannen einer Schicht reduziert einerseits die Schichtablösung, beeinträchtigt andererseits jedoch die Wirtschaftlichkeit der generativen Fertigung. Überdies wird von HAUSER et al. (2005) berichtet, dass eine ausreichende Strahlleistung von vorrangiger Bedeutung für die Schichtanbindung ist. Es muss soviel Wärme eingebracht werden, dass mindestens die vorangehende Schicht unterhalb der zu verfestigenden Bereiche erneut aufgeschmolzen wird und auf diese Weise eine belastbare Verbindung entsteht. Die Autoren betonen zudem, dass die Wahrscheinlichkeit der Schichtablösung mit abnehmender Schichthöhe sinkt.

2.5 Zusammenfassung

Das Kapitel 2 adressiert die im Rahmen der Arbeit zu eliminierenden Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung*. Zu diesen Fehlerbildern wurde der jeweilige Wissensstand hinsichtlich Erklärungsmodellen und Maßnahmen zur Vermeidung dargestellt. Da das *Pulververblasen* im Zusammenhang mit dem Laserstrahlschmelzen nicht beobachtet wurde, beziehen sich die bisherigen Erkenntnisse diesbezüglich ausschließlich auf den Bereich des Elektronenstrahlschmelzens. Wie die Evaluation innerhalb von Kapitel 2 zeigt, wurden durch die Arbeiten Dritter insbesondere elektrostatische Abstoßungseffekte sowie die Impulsübertragung zwischen Elektronenstrahl und Pulverbett für das Auftreten dieses Fehlerbildes verantwortlich gemacht.

Für die *Schmelztropfenbildung* und die *Schichtablösung* umfasst der bisherige Wissensstand neben dem Elektronenstrahlschmelzen auch die angrenzende Technologie des Laserstrahlschmelzens. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die beiden letztgenannten Fehlerbilder auch bei den laserstrahlbasierten Schichtbauverfahren zu beobachten sind. In diesen Fällen behandelten die Abschnitte 2.3 und 2.4 zusätzlich zu Erklärungsmodellen und geeigneten Gegenmaßnahmen auch Schlussfolgerungen bei der Übertragung dieser Erkenntnisse im Hinblick auf die Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens.

Im Folgenden wird zunächst eine Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens vorgestellt. Dabei kommen Werkzeuge und Vorgehensweisen der Systemtechnik zum Einsatz, um die Komplexität der Betrachtung zu reduzieren und damit eine für die Zielsetzung der Arbeit notwendige Detaillierungsebene des Prozessmodells zu schaffen. Dazu werden vor allem die Ein- und Ausgangsgrößen des zu modellierenden Teilsystems auf der Basis des in Kapitel 2 hergeleiteten Erkenntnisstands bestimmt.

3 Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens

3.1 Allgemeines und Methodenentwurf

Der zentrale Aspekt von Kapitel 3 besteht darin, die der Arbeit zugrunde liegende Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens (vgl. Abbildung 23) zu entwerfen sowie ihre Anwendung zu beschreiben. Diese strukturierte Vorgehensweise verfolgt das Ziel, die Grundlagen der Modellierung und Simulation mit der spezifischen Anwendung im Rahmen der Arbeit zusammenzuführen und auf diese Weise möglichst effektiv nutzbar zu machen. Damit wird zum einen die Erweiterung des Prozessverständnisses für das Elektronenstrahlschmelzen angestrebt. Zum anderen sollen die zuvor definierten Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* eliminiert werden.

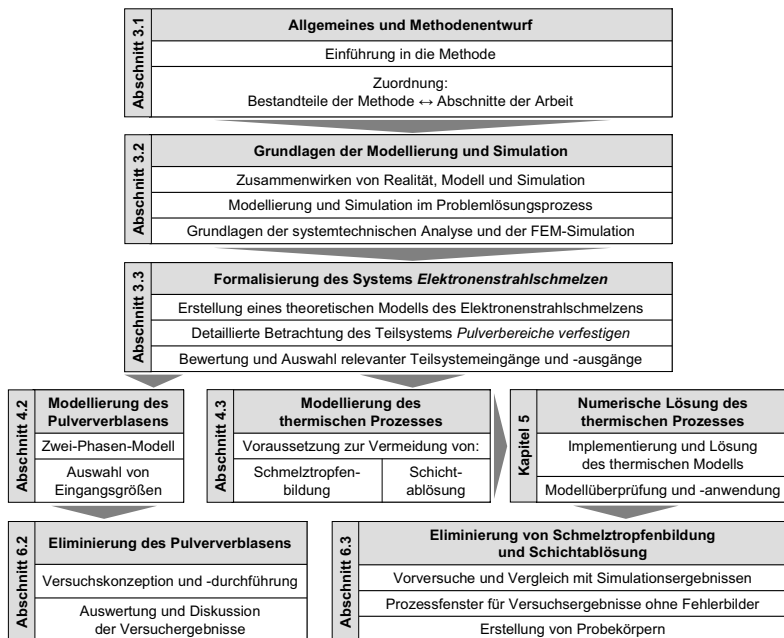


Abbildung 23: Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens und Zuordnung der Bestandteile zu den Abschnitten der Arbeit

Wie der obigen Abbildung 23 zu entnehmen ist, werden in Abschnitt 3.2 die Grundlagen der Modellierung und Simulation erläutert. Dieser Abschnitt geht zunächst auf die Zusammenhänge zwischen Realität, Modellierung und Simulation ein und beschreibt die Einbindung der beiden letztgenannten Entwicklungswerkzeuge in den Problemlösungsprozess. Die Systemtechnik ermöglicht im Hinblick auf die Modellierung die strukturierte Reduktion der Ein- und Ausgangsgrößen und ist daher Gegenstand der weiteren Arbeit. Abschließend werden die Grundlagen der rechnergestützten Simulation von Temperaturfeldern mit Hilfe der FEM dargelegt.

Die eindeutige Abgrenzung des zu untersuchenden Systems in Abschnitt 3.3 ist die Grundlage für die erfolgreiche Erstellung eines mathematischen Modells sowie zur anschließenden Simulation (vgl. Abbildung 23). Dazu wird ein theoretisches Modell benötigt, welches mit Hilfe der Systemtechnik erstellt wird. Diese sog. Formalisierung ist daher Gegenstand im weiteren Verlauf dieses Kapitels. Um zum Kern der Aufgabe, der Untersuchung der thermischen Abläufe im Metallpulver bei der Energieeinkopplung des Elektronenstrahls, zu gelangen, muss im Anschluss der Detaillierungsgrad des theoretischen Modells erhöht werden. Ein weiterer entscheidender Faktor bei der Modellierung ist die umfassende Berücksichtigung der relevanten Ein- und Ausgänge des betrachteten Teilsystems. Analog zum Top-down-Prozess der Modellierung werden die Eingangsgrößen gesammelt, hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Zielsetzung der Arbeit bewertet und die zu berücksichtigenden Faktoren ausgewählt. Das Vorgehen in Bezug auf die Ausgangsgrößen weicht von dem der Eingangsgrößen ab, da als Ergebnis des Elektronenstrahlschmelzens sowohl angestrebte als auch unerwünschte Resultate auftreten können. Im Sinne der Zielsetzung (vgl. Unterabschnitt 1.5.1) sind diese Prozessdefizite unbedingt zu vermeiden. Daher ist nicht die detaillierte Untersuchung der Ausprägungen der Prozessdefizite entscheidend, sondern vielmehr, sie gänzlich zu unterbinden. Aus diesem Grund werden ausschließlich die angestrebten Prozessergebnisse sowie geeignete Messverfahren vorgestellt.

Im weiteren Verlauf beschreibt die Methode die voneinander getrennte mathematische Modellierung des Pulververblasens (vgl. Abschnitt 4.2) sowie des thermischen Prozesses (vgl. Abschnitt 4.3). In Bezug auf das Pulververblasen wird das sog. Zwei-Phasen-Modell formuliert, das relevante physikalische Mechanismen, die in Abschnitt 2.2 untersucht und bewertet wurden, zusammenfasst. Die beschreibenden Gleichungen werden im Zwei-Phasen-Modell dem zeitlichen Ablauf des Pulververblasens zugeordnet. Damit ist es in der Folge möglich, die zu berücksichtigenden Eingangsgrößen sowohl auszuwählen als auch ihren Einfluss auf das Pulververblasen zu ermitteln. Der in den Abschnitten 2.3 und 2.4 aufgeführte Stand der Erkenntnisse verdeutlicht, dass die Temperaturverteilung in der Prozesszone das Auftreten der beiden Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* wesentlich beeinflusst. Daher ist die Modellierung des

thermischen Prozesses die Voraussetzung zur Vermeidung dieser beiden Fehlerbilder beim Elektronenstrahlschmelzen.

Wie Abbildung 23 verdeutlicht, muss das thermische Prozessmodell, im Gegensatz zur mathematischen Beschreibung des Pulververblasens (vgl. Kapitel 5), numerisch gelöst werden. Dazu werden die formulierten Gleichungen in eine rechnerstützte Simulationsumgebung implementiert. Bevor das auf diese Weise erzeugte FEM-Modell angewendet werden kann, bedarf es einer Überprüfung, bei welcher die Übereinstimmung mit der Realität evaluiert wird. Um diese abschließend beurteilen zu können, muss die Vermeidung der drei beschriebenen Fehlerbilder mit experimentellen Untersuchungen nachgewiesen werden. Dazu werden in Abschnitt 6.2 zunächst Versuche zum Pulververblasen konzipiert sowie die Resultate ausgewertet und diskutiert (vgl. Abbildung 23). Im Anschluss daran werden die Simulationsergebnisse mit Vorversuchen zur Schmelztropfenbildung und Schichtablösung verglichen und darauf basierend ein Prozessfenster für Versuchsergebnisse ohne Fehlerbilder entwickelt (vgl. Abschnitt 6.3). Der abschließende Beweis der Eliminierung wird im Folgenden durch die Erstellung von Probekörpern erbracht, wobei zur Fertigung Parametereinstellungen aus dem o. g. Prozessfenster verwendet werden.

Wie bereits beschrieben, werden in Abschnitt 3.2 die Grundlagen der Modellierung und Simulation vorgestellt.

3.2 Grundlagen der Modellierung und Simulation

3.2.1 Begriffsdefinition

In Wissenschaft und Forschung sind Modelle zweckgebundene, vereinfachte Repräsentationen von realen Zusammenhängen (BÖHMER 1997). Die Abbildung und insbesondere die Auswahl der als relevant erachteten Aspekte eines Modells hängen wesentlich davon ab, für welche Anwendungen das Modell formuliert werden soll. Um relevante Erkenntnisse zu erhalten, bedarf es eines experimentierfähigen Modells, einer sog. Simulationsumgebung. In Abbildung 24 ist der Zusammenhang zwischen Realität, Modell und Simulation nach SCHILLER (2007) skizziert.

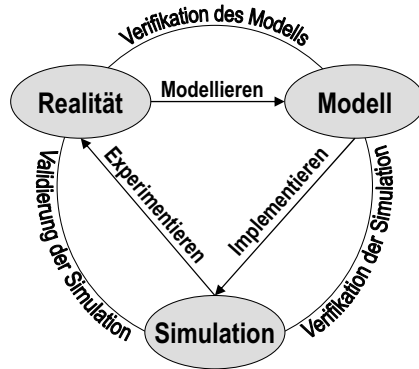


Abbildung 24: Zusammenwirken von Realität, Modell und Simulation (SCHILLER 2007)

Die VDI 3633 (1993), die die Basis für die Definitionen nach SCHILLER (2007) bildet, stellt ein Grundlagenverständnis für die „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“ zur Verfügung. Demnach ist ein Modell „eine vereinfachte Darstellung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems, dessen Prozesse in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System nachgebildet werden“ (VDI 3633 1993). Es wird genutzt, um eine bestimmte Fragestellung zu klären, deren Beantwortung mittels direkter Operation am Original nicht möglich oder zu aufwändig wäre. Ein Modell unterscheidet sich hinsichtlich der zu betrachtenden Eigenschaften von der Realität nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens. Eine Simulation hingegen ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten von Experimenten, d. h. die gezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe, verstanden (VDI 3633 1993).

3.2.2 Modellierung und Simulation im Problemlösungsprozess

Die Modellierung umfasst in der ersten Stufe das Umsetzen eines existierenden oder gedachten Systems in ein theoretisches bzw. symbolisches Modell, das noch nicht ablauf- oder experimentierfähig ist. Dieser Schritt, für den u. a. systemtechnische Methoden zum Einsatz kommen (vgl. Abschnitt 3.3), ist für den Erfolg eines Simulationsexperiments besonders wichtig und umfasst mit der Analyse und der Abstraktion zwei korrelierende Tätigkeiten. Bei der Systemanalyse erfolgt zum Zweck der Strukturierung die gedankliche Auflösung des Originalsystems in seine Elemente. Während der gleichzeitig ablaufenden Abstraktion werden die gefundenen Zusammenhänge durch Reduktion (Verzicht auf unwichtige Einzelheiten) und Idealisierung (Vereinfachung unverzichtba-

rer Einzelheiten) so verallgemeinert, dass ein auf das Wesentliche beschränktes hinreichend genaues Abbild des Originalsystems entsteht (VDI 3633 1993).

Im Rahmen der zweiten Stufe der Modellierung werden mathematische Beziehungen abgeleitet. Dies sind Funktionen zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen des Modells bzw. Funktionen zwischen Zustandsgrößen, welche das Verhalten des zuvor beschriebenen Systems in einem begrenzten Geltungsbereich beschreiben oder erklären. Bei der mathematischen Modellierung wird damit ein System algebraischer Gleichungen, gewöhnlicher und/oder partieller Differentialgleichungen (DGL) unter Berücksichtigung vereinfachender Annahmen und von Anfangs- und Randbedingungen erzeugt, das auf einer bestimmten Struktur bzw. Parametern basiert (BÖHMER 1997). Mit einem derartigen mathematischen Prozessmodell können aufgrund seiner Komplexität i. d. R. keine Experimente durchgeführt werden. Daher muss es in eine ausführbare Form, z. B. in ein rechnerlesbares Programm, überführt werden. Dieser Schritt wird auch als Implementierung bezeichnet und kann entweder mittels einer Programmiersprache oder mittels graphisch-interaktiver Software erfolgen. Nach GROTH & MÜLLER (2007) werden zur Lösung einer technischen Aufgabe mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode die folgenden vier Arbeitsschritte sequentiell durchlaufen:

- Schritt 1: Idealisierung
- Schritt 2: Modellerstellung
- Schritt 3: Lösung
- Schritt 4: Auswertung der Ergebnisse

Im Anschluss bedarf die Simulation einer Validierung, bei der geprüft wird, ob das FEM-Modell bzw. dessen Ergebnisse mit experimentellen Messergebnissen am realen System übereinstimmen. Eine vollständige Korrelation ist nur innerhalb eines definierten Toleranzrahmens erzielbar, der durch das Untersuchungsziel, die gewünschte Ergebnisgenauigkeit und die Modelldetaillierung bestimmt wird. Dies kann dazu führen, dass sich aus Analysen und Plausibilitätstests sowie dem Abgleich mit der Realität solange ein iterativer Prüf- und Korrekturprozess einstellt, bis die problemspezifischen Anforderungen an die Simulation erreicht werden (VDI 3633 1993).

Mit Hilfe eines Simulationsmodells, dessen Gültigkeit nachgewiesen wurde, ist es durch geeignete Parametervariationen möglich, zur Lösung des Ausgangsproblems zu gelangen. Dieser durch den Begriff *Modellnutzung* bezeichnete Vorgang ermöglicht es, Erkenntnisse über die Struktur des Lösungsraums, z. B. durch Sensitivitätsanalysen oder Optimierungsrechnungen zu schaffen (BÖHMER 1997).

3.2.3 Systemtechnische Analyse

Zur Erstellung eines theoretischen Modells bedarf es der Analyse und Abstraktion des realen Systems (vgl. Unterabschnitt 3.2.2). Zu diesem Zweck hat sich die Systemtechnik, eine Teildisziplin der Systemtheorie, bewährt. Die Systemtheorie stellt die theoretischen Grundlagen zur Untersuchung von Systemen zur Verfügung. Dabei ist ihr Einsatz nicht auf die Ingenieurwissenschaften begrenzt. Anwendungen existieren überdies in den Bereichen Biologie, Soziologie, Psychologie, in den Wirtschaftswissenschaften, in der Mathematik, Physik, Informatik sowie der in Philosophie und Linguistik (PULM 2004). Ungeachtet des jeweiligen Fachgebiets wird der Untersuchungsgegenstand dabei als System aufgefasst, d. h. als eine Menge von Elementen, die mit diskreten Attributen bzw. Eigenschaften versehen sind. Diese Elemente stehen durch Relationen, d. h. Verknüpfungen, Beziehungen oder Kommunikation miteinander in einem organisierten Bezug (PATZAK 1982). Trotz unterschiedlicher Wissenschaftsbereiche wurde festgestellt, dass die Systeme gleichen Gesetzen unterliegen und mit denselben Methoden und Verfahren analysierbar und synthetisierbar sind (BERTALANFFY 1969).

Im Rahmen der Systemtechnik bzw. des sog. Systems Engineering werden technische Gebilde, wie beispielsweise der Prozess des Elektronenstrahlschmelzens, als Systeme betrachtet, die durch Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen mit ihrer Umgebung in Verbindung stehen. Diese Größen überschreiten die Systemgrenze, die die Bestandteile eines Systems, d. h. Elemente oder Teilsysteme, gegenüber der Umwelt eindeutig differenziert (vgl. Abbildung 25).

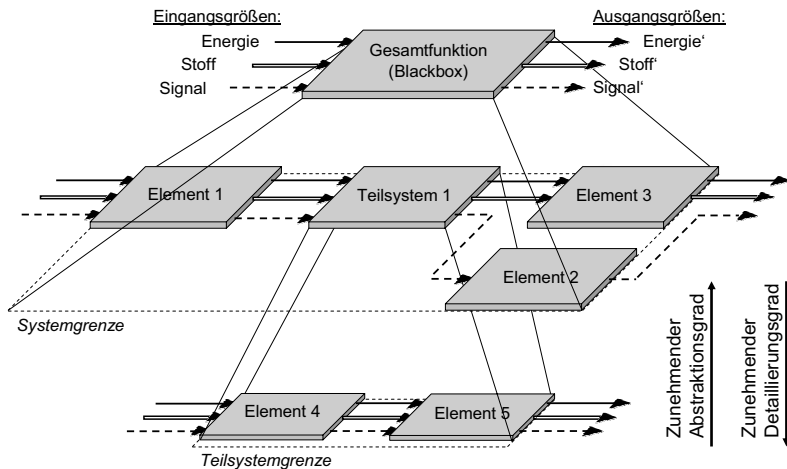


Abbildung 25: Zusammenhänge und Begriffe der Systemtechnik nach PAHL et al. (2007)

Technische Systeme, wie z. B. Anlagen, Apparate, Maschinen, Geräte und Baugruppen, dienen einem technischen Prozess, mit welchem Energien, Stoffe und Signale umgesetzt werden. Dabei bestimmt die Aufgabe oder die Art der Lösung, welcher der zuvor genannten Umsätze dominiert. Es ist zweckmäßig, diesen dann als Hauptfluss zu betrachten, wobei ihn meistens ein weiterer oder beide weiteren Flüsse ganz oder teilweise begleiten. Demgegenüber tragen Nebenfunktionen im Sinne von Hilfswirkungen nur mittelbar zur Gesamtfunktion bei, indem sie unterstützende oder ergänzende Aufgaben übernehmen (PAHL et al. 2007).

Da Elemente eines Systems selbst Teilsysteme sein können (s. o.), ist es entsprechend Abbildung 25 möglich, ein Teilsystem detaillierter zu analysieren und eine Untergliederung vorzunehmen. Mit dieser Vorstellung können auf jeder Stufe der Abstraktion geeignete Systeme für einen bestimmten Modellierungszweck definiert werden (DAENZER & BÜCHEL 2002). Die höchste Abstraktionsstufe des zu untersuchenden Systems ist die sog. Blackbox-Betrachtung. Bei diesem Ansatz werden die Interaktionen eines Systems bzw. Teilsystems mit seiner Umgebung in den Mittelpunkt der Betrachtung gerückt. Dies bedeutet, dass Abläufe und Details im Inneren der Blackbox nicht von Interesse sind (WALTHER 2001). Stehen hingegen die Abläufe innerhalb eines Elements im Vordergrund, so muss ein höherer Detaillierungsgrad gewählt werden. Damit ist eine genauere Untersuchung und Beschreibung des jeweiligen Elements über seine Attribute (Eigenschaften, Funktionen, Input und Output) möglich. Ein Element wird über Inputs von anderen Elementen beeinflusst bzw. wirkt über seine Outputs auf andere Elemente ein. Input und Output geben also, analog zum gesamten System, den Austausch von Größen (z. B. Energie, Stoff, Information) mit der Elementumgebung wieder. Dabei sind die von einem an ein weiteres Element übergebenen Größen zwischen Output und Input konstant (NEGELE 1998).

Die Verknüpfung der Elemente untereinander sowie zur Systemumgebung wird durch Relationen wiedergegeben und ermöglicht eindeutige Aussagen über die entsprechenden Wechselwirkungen. Die Funktion eines Elementes ist abhängig von den Input- und Elementeigenschaften und beschreibt in Abhängigkeit des Detaillierungsgrads in deskriptiver, qualitativer oder quantitativer Form die Überführung von Inputs zu Outputs. Dabei kann es sich sowohl um erwünschte als auch um unerwünschte Outputs bzw. Funktionen handeln. Abschließend beschreiben Verhaltenseigenschaften das auf den Eigenschaften der Beschaffenheit und der Funktion basierende Verhalten eines Systems bezüglich der Wechselwirkung mit seiner jeweiligen Umwelt (PATZAK 1982).

Der Vorgang bei der Erstellung eines theoretischen Modells, d. h. die Beschreibung eines realen Systems mit Hilfe von Elementen, Eigenschaften und Relationen, wird auch als *Formalisierung* bezeichnet. Damit wird eine formale Sprache zur Verfügung gestellt, deren Ziel es ist, basierend auf wenigen, generisch anwendbaren Modellkomponenten beliebige reale Systeme innerhalb eines systemtechnischen Modells abbilden zu

können. Es kann konstatiert werden, dass die Unterscheidung in eine deskriptive, qualitative und quantitative Formulierung zugleich auch den semantischen Prozess der Modellbildung widerspiegelt, da eine zunehmende Präzisierung, Formalisierung und Abstraktion der abzubildenden Informationen stattfindet (NEGELE 1998).

An die Formalisierung des zu untersuchenden Systems schließt sich die Formulierung mathematischer Zusammenhänge zur Beschreibung relevanter Abläufe an. Zur Lösung der resultierenden Gleichungen werden, wie bereits oben ausgeführt, häufig rechnergestützte Methoden benötigt. Die numerischen Grundlagen sowie die physikalischen Gesetzmäßigkeiten für Temperaturfeldberechnungen mit Hilfe der FEM sind Gegenstand des folgenden Unterabschnitts 3.2.4.

3.2.4 Einführung in die Finite-Elemente-Methode (FEM)

Viele technische Vorgänge, z. B. aus dem Bereich der Elastizitätslehre, der Strömungsmechanik sowie bei der Temperaturfeldberechnung, lassen sich durch Differentialgleichungen beschreiben (vgl. Unterabschnitt 3.2.2). Zur Lösungssuche für diese Differentialgleichungen stehen analytische und numerische Verfahren zur Verfügung. Die Vertreter der erst genannten Gruppe werden im allgemeinen Sprachgebrauch oft als *exakte Verfahren* bezeichnet. Vielfach muss die reale Aufgabenstellung jedoch sehr weit idealisiert und vereinfacht werden, damit eine passende DGL aufgestellt werden kann. In der Folge können die Ergebnisse aufgrund der getroffenen Vereinfachungen stark von der Wirklichkeit abweichen. Die Anwendung von analytischen Verfahren zur Lösung eines mathematischen Modells auf Basis von Differentialgleichungen beschränkt sich daher bei praxisrelevanten Beispielen auf wenige Sonderfälle. Oftmals sind numerische Ansätze, wie beispielsweise die FEM, besser geeignet (BATHE 1986). Sie erlauben zwar nur Näherungslösungen, sind aber auch auf komplexe Geometrien anwendbar (GROTH & MÜLLER 2007).

Bei der FEM wird, wie bei allen numerischen Verfahren, ein Näherungsansatz für die unbekannte Funktion aufgestellt. Diese Funktion bezieht sich auf eine charakteristische Größe, wie beispielsweise die Temperatur. Weitere relevante Werte, wie z. B. die Wärmestromdichte, können im Anschluss durch Ableiten der Funktion u. a. nach den Koordinaten ermittelt werden (BATHE 1986). In der Regel wird für die Näherung ein Produktansatz gewählt, der aus vorgegebenen Formfunktionen und freien Koeffizienten besteht. Diese Formfunktionen müssen gegebene Forderungen, z. B. die Differentialgleichungen im Innern des Gebiets oder bestimmte Bedingungen am Rand, erfüllen (GROTH & MÜLLER 2000). Im Rahmen der FEM wird das zu berechnende Gebiet in einzelne Bereiche unterteilt. Dementsprechend beziehen sich die Ansatzfunktionen nur über diese *Finite Elemente* genannten Teilgebiete. Es werden also ausschließlich bereichsweise Ansatzfunktionen eingeführt, die an den Übergängen der Bereiche, den sog. Knoten,

kontinuierlich an die Nachbarbereiche anschließen (Stetigkeitsbedingung). Die Näherungsfunktion für das Gesamtgebiet setzt sich also aus den Lösungsansätzen kleinerer Teilgebiete zusammen. Daher können hierfür Formfunktionen niedriger Ordnung zum Einsatz kommen. Entscheidend ist, dass für die Teilbereiche gleiche Formfunktionen angesetzt werden. Anstelle der frei wählbaren Koeffizienten werden physikalisch relevante Größen, wie beispielsweise die Temperatur, eingeführt, die auch als *Freiheitsgrade* bezeichnet werden (KLEIN 1997).

Für das Auftreten der Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* beim Elektronenstrahlschmelzen sind, wie bereits oben diskutiert, besonders thermische Effekte ursächlich. Aus diesem Grund konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen auf die Temperaturfeldberechnung mit Hilfe der FEM.

3.2.5 Temperaturfeldberechnung mit Hilfe der FEM

Für die Temperaturfeldberechnung innerhalb der Prozesszone des Elektronenstrahlschmelzens ist die Bestimmung des Wärmeflusses durch Wärmeleitung von grundlegender Bedeutung. Wärmeleitung ist die materiegebundene Energieübertragung durch Gitterschwingungen und bewegliche Ladungsträger (BAEHR & STEPHAN 1998). Der damit verbundene Wärmestrom berechnet sich nach dem Grundgesetz der Wärmeleitung (vgl. Gl. (15)):

$$d\dot{Q} = -\lambda \cdot (\text{grad } T) \cdot \{n\} \cdot dA = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dA \quad (15)$$

Mit obiger Formel wird der Energiefluss durch ein beliebig orientiertes Flächenelement dA mit dem Normalenvektor $\{n\}$ definiert, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit und $\partial T / \partial n$ die Ableitung der Temperatur in Richtung der äußeren Flächennormalen wiedergibt (BAEHR & STEPHAN 1998).

In Analogie hierzu wird bei der Finite-Elemente-Methode nach den Temperaturen der in Unterabschnitt 3.2.4 eingeführten Knoten mit dem in Gl. (16) formulierten Gleichungssystem gelöst (GROTH & MÜLLER 2000):

$$\{Q\} = -[k] \cdot \{T\} \quad (16)$$

In der Matrix $[k]$ sind die Koeffizienten des Gleichungssystems zusammengefasst. Da sich die Koeffizienten bei der Temperaturfeldberechnung im Wesentlichen aus Materialdaten errechnen, wird $[k]$ auch als Leitfähigkeitsmatrix bezeichnet. Der Vektor $\{Q\}$ spiegelt die Lasten wider, die sich aus der äußeren Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr ergeben. Wenn n unbekannte Knotentemperaturen eingeführt werden, hat die Matrix $[k]$ die Ordnung (n,n) und die Vektoren $\{T\}$ bzw. $\{Q\}$ haben dementsprechend die Ord-

nung $(n,1)$. Die gesuchten Knotentemperaturen $\{T\}$ ergeben sich aus der Lösung des Gleichungssystems

$$\{T\} = -[k]^{-1} \cdot \{Q\} \quad (17)$$

Nach BATHE (1986) ergibt sich für den Fall einer transienten, d. h. instationären, Wärmeübertragung in der FEM unter Berücksichtigung der Wärmekapazitätsmatrix $[C]$ eine gekoppelte Gleichung im Sinne einer Erweiterung von Gl. (16):

$$[C] \cdot \{\dot{T}\} + [k] \cdot \{T\} = -\{Q(t)\} \quad (18)$$

Im Gegensatz zu transienten Problemen in der Strukturmechanik (vgl. KLEIN 1997) tritt in o. g. Gleichung (18) keine zweite Ableitung der charakteristischen Größe auf. Daraus folgt, dass sich bei der Lösung von Temperaturfeldaufgaben keine Schwingungen des Ergebniswertes einstellen können, sondern vielmehr nur abklingende Verläufe möglich sind (BATHE 1986).

Der Abschnitt 3.2 adressiert die Grundlagen der Modellierung und Simulation. Dabei wird u. a. eine Einführung in die Systemtechnik als Hilfsmittel zur Reduktion der Komplexität von technischen Aufgabenstellungen gegeben. Im Folgenden findet dieses Werkzeug Anwendung, indem das System *Elektronenstrahlschmelzen* nach der sog. Top-down-Methode, d. h. der Detaillierung ausgehend vom Ganzen, formalisiert und damit in ein theoretisches Modell überführt wird.

3.3 Formalisierung des Systems Elektronenstrahlschmelzen

3.3.1 Festlegung der Systemgrenze

Der Ausgangspunkt für die systemanalytische Betrachtung des Elektronenstrahlschmelzens ist die Identifikation der Systemgrenzen. Dabei gilt die Prämisse, dass sich das System in relativer Autonomie verhalten soll. Demnach ist die Grenze dort zu legen, wo die Kopplungen zur Umgebung sehr viel schwächer als die Relationen innerhalb des Systems sind. Das bedeutet, dass Wirkungen der Umwelt auf den Zustand oder das Verhalten des Systems nicht nachweisbar oder in ihrer Größe vernachlässigbar sind. Andererseits gilt es bei der Festlegung zu bedenken, dass sich die Systemgrenze auch nach dem Modellzweck richtet, also die vorhandenen Umweltkopplungen bezüglich der zu lösenden Aufgabenstellung nicht funktionsrelevant sind (SCHILLER 2007). Der vorangehenden Definition folgend sind die zentralen Bestandteile des Elektronenstrahlschmelzens für diese Arbeit die Elektronenstrahlkanone sowie der darunter angeordnete Pulverauftragsmechanismus (vgl. Abbildung 26).

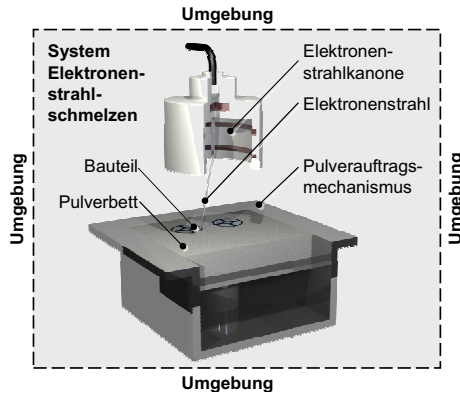


Abbildung 26: Abgrenzung des betrachteten Systems Elektronenstrahlschmelzen von seiner Umgebung

Mit diesen beiden Komponenten ist ein idealer Systemumfang gegeben. Zum einen ist eine weitere Fassung der Systemgrenze, beispielsweise einschließlich der Vakuumpumpen, hinsichtlich der zu untersuchenden Fragestellungen, d. h. der Untersuchung aktueller prozessbezogener Fehlerbilder, nicht zweckmäßig. Zum anderen verfügen die enthaltenen Aspekte Elektronenstrahl, Pulverbett und Bauteil über eine starke Binnenkopplung, da mit ihnen die zentralen Elemente des Prozesses *Elektronenstrahlschmelzen* gegeben sind. Abschließend ist das in Abbildung 26 gezeigte System sowohl räumlich als auch im Hinblick auf externe Einflussgrößen durch das in der EB-Kanone und der Bearbeitungskammer herrschende Vakuum hermetisch von seiner Umgebung getrennt.

3.3.2 Eingänge und Ausgänge des Systems Elektronenstrahlschmelzen

Basierend auf der Festlegung der Systemgrenze erfolgt im Anschluss die Bestimmung der für den Modellzweck relevanten Ein- und Ausgänge. Diese lassen sich nach PAHL et al. (2007) in die Kategorien *Energie-*, *Material-* und *Informationsfluss* aufteilen. Im konkreten Fall sind dies *elektrische Energie*, *Metallpulver* und die *Baujobdaten*. Es ist zu berücksichtigen, dass Systemeingänge Kategorien darstellen und sich sowohl aus kontrollierbaren als auch aus nicht-kontrollierbaren Größen, d. h. Störungen, zusammensetzen können (DAENZER & BÜCHEL 2002).

Ein Beispiel für einen kontrollierbaren Systemeingang ist der in den Baujobdaten einstellbare Strahlstrom während des Verfestigungsschrittes. Eine Störgröße hingegen ist beispielsweise der Anteil von Oxidablagerungen auf den Pulverpartikeln, die zu Einschlüssen im Bauteilgefüge führen können (SIGL 2008). Analog zu den Eingängen lassen sich auch die Systemausgänge in die genannten Arten aufteilen. Hinsichtlich der

Energie ist hier die im resultierenden Bauteil *gespeicherte Wärme* zu nennen. In Bezug auf den *Materialfluss* ist das *Bauteil* als Ausgangsgröße anzusehen und als *Information* meldet die Prozesssteuerung zurück, dass das *Baujobende erreicht* ist.

3.3.3 Strukturierung des realen Systems Elektronenstrahlschmelzen

Die Basis für die Strukturierung des Systems *Elektronenstrahlschmelzen* in Teilsysteme und Elemente ist der in Unterabschnitt 1.3.3 vorgestellte Prozessablauf (vgl. Abbildung 8). Vor der eigentlichen Werkstückerstellung wird die Grundplatte über einen Zeitraum von 600 s mit Hilfe des Elektronenstrahls aufgeheizt. Damit wird die Temperatur der ersten Pulverschicht zum Zweck der Vermeidung des Pulververblasens erhöht, da die im darauf folgenden *Schichtauftrag* platzierten Pulverpartikel bereits erste Sinterhälse untereinander sowie zur Grundplatte ausbilden können. Der Prozessschritt *Pulver vorheizen* unterstützt den Effekt der Sinterhalsbildung zusätzlich, indem ein defokussierter Elektronenstrahl die Temperatur der aufgetragenen Pulverschicht insgesamt steigert. Im Anschluss findet die eigentliche Formgebung durch das selektive Verfestigen des Pulvermaterials statt (SIGL et al. 2006).

Die Bezeichnung von Elementen bzw. Teilsystemen basiert auf der Beschreibung des jeweiligen Vorgangs durch die Angabe eines Substantivs in Verbindung mit einem Verb (PAHL et al. 2007). Vor dem Hintergrund des o. g. Ablaufs sowie unter Berücksichtigung der bereits definierten Systemgrenze lässt sich das betrachtete System *Elektronenstrahlschmelzen* demnach in die folgenden Funktionen untergliedern:

- *Elektronenstrahl erzeugen*
- *Grundplatte vorheizen*
- *Pulverschicht auftragen*
- *Pulverschicht vorheizen*
- *Pulverbereiche verfestigen*

Diese Funktionen können ihrerseits Elemente oder Teilsysteme sein. Es werden im weiteren Verlauf allerdings nur diejenigen Teilsysteme weiter in Elemente aufgegliedert, die unter Einbeziehung des Untersuchungsgegenstandes von Interesse sind. Der nächste Schritt hat zum Ziel, die Interaktion zwischen den oben definierten Elementen bzw. Teilsystemen festzulegen.

3.3.4 Interaktion innerhalb des Systems Elektronenstrahlschmelzen

Nachdem im Vorangehenden die Systemgrenze, die Systemein- und ausgänge sowie die Funktionen definiert wurden, werden nun ihre Relationen untersucht. Beginnend bei den Eingangsgrößen wird *elektrische Energie* dazu verwendet, um den Elektronenstrahl durch Heizen der Glühkathode sowie durch Aufbringen der Wehnelt- und der Beschleunigungsspannung zu erzeugen (vgl. Unterabschnitt 1.3.1). Die Leistung des Elektronenstrahls wird im Anschluss für die Funktionen *Grundplatte vorheizen*, *Pulverschicht vorheizen* und *Pulverbereiche verfestigen* aufgewendet. Für den Schritt *Pulverschicht auftragen* benötigt die installierte Mechanik als Eingang die *elektrische Energie*. Bei *Grundplatte vorheizen* werden erstmals die *Baujobdaten*, d. h. die Information der Vorheizdauer und der Strahlleistung, miteinbezogen. Diese Funktion gibt als Signal den Abschluss des Vorheizvorgangs zurück. Der einfachen Lesbarkeit halber werden die Informationen von einem Element zum anderen, und nicht zentral verteilt, weitergegeben.

Mit dem darauffolgenden Schritt *Pulverschicht auftragen* beginnt der eigentliche Bauprozess und damit die Zufuhr von *Metallpulver*. Die aufgetragene Pulverschicht wird zuerst dem Element *Pulverschicht vorheizen* und im Anschluss dem Element *Pulverbereiche verfestigen* zugeführt. Der Ablauf aus den drei zuletzt genannten Elementen wird solange wiederholt, bis das *Baujobende erreicht* ist. Dies wird in der Funktionsstruktur durch den Informationsrückfluss zu *Pulverschicht auftragen* repräsentiert. Als materielle Ausgangsgröße des Systems ist entsprechend der Hauptaufgabe des Elektronenstrahlschmelzens das *Bauteil* zu erachten, welches über eine im Inneren *gespeicherte Wärme*, d. h. Energie, verfügt. Zur besseren Verständlichkeit beinhaltet die Funktionsstruktur (vgl. Abbildung 27) nur Hauptflüsse. Diese tragen, im Gegensatz zu irrelevanten Nebenfunktionen und -flüssen, wie beispielsweise Verlustleistungen, unmittelbar zur Erfüllung der Gesamtfunktion bei (PAHL et al. 2007).

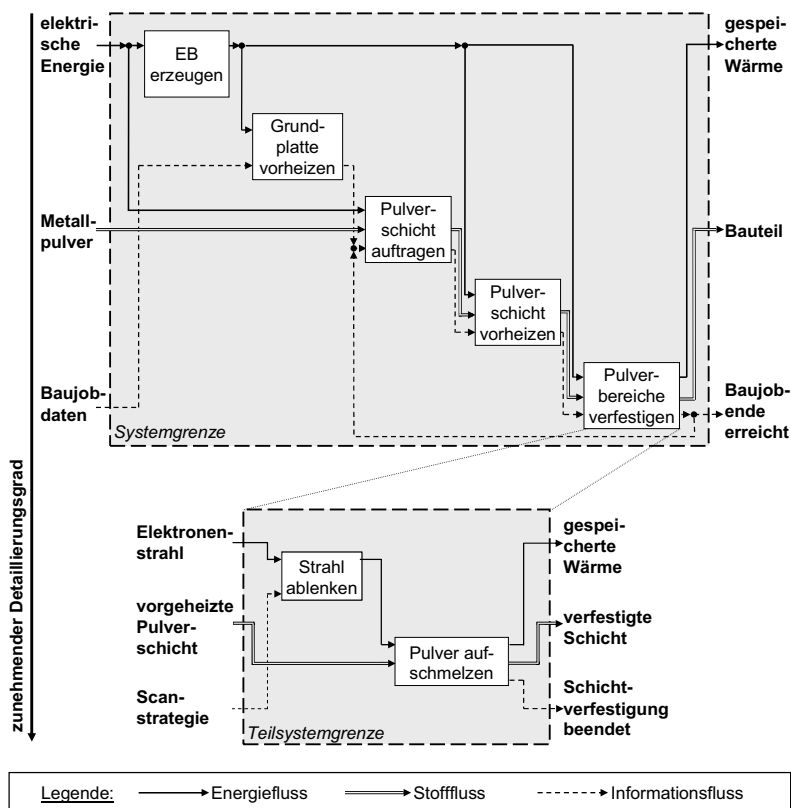


Abbildung 27: Funktionsstruktur des Systems Elektronenstrahlschmelzen (oben) sowie des Teilsystems Pulverbereiche verfestigen (unten)

Für die eigentliche Fragestellung der Untersuchung, d. h. die Analyse und Eliminierung der unerwünschten Fehlerbilder bei der Verfestigung des Pulvers, ist im Wesentlichen die Funktion *Pulverbereiche verfestigen* relevant. In Bezug auf diese Funktion wird der Detaillierungsgrad im Folgenden erhöht. Die Vorgehensweise entspricht in diesem Fall derjenigen zur Strukturierung eines Systems (vgl. Unterabschnitt 3.3.3).

3.3.5 Erhöhung des Detaillierungsgrads der Betrachtung

Da die Teilsystemgrenze durch die Funktion *Pulverbereiche verfestigen* definiert wird, sind zunächst die Teilsystemein- und -ausgänge basierend auf der Funktionsstruktur in Abbildung 27 (oben) zu bestimmen. Daraus leitet sich ab, dass der *Elektronenstrahl*

dem Energiefluss und die *vorgeheizte Pulverschicht* der zugeführten Materie entspricht. Der Informationseingang ist in Form der *Scanstrategie* gegeben. Auf der Ausgangsseite sind diesbezüglich die *gespeicherte Wärme*, die *verfestigte Schicht* und das Steuerungssignal, dass die *Schichtverfestigung beendet* ist, als relevante Größen zu erachten (vgl. Abbildung 27 unten).

Das Teilsystem *Pulverbereiche verfestigen* lässt sich durch die beiden Elemente *Strahl ablenken* und *Pulver aufschmelzen* beschreiben. Um den *Elektronenstrahl* zur Füllung des Bauteilquerschnitts abzulenken, bedarf es zunächst der Verknüpfung mit der gewählten *Scanstrategie*. Damit wird der Auftreffpunkt des Strahls gezielt über die zu verfestigenden Bereiche der vorgeheizten Pulverschicht geführt. Der gewählte Detaillierungsgrad spiegelt eine ideale Basis für die weiteren Untersuchungen wider, denn er ermöglicht eine Konzentration auf Größen, die für die Zielsetzung der Arbeit, d. h. die Eliminierung der Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung*, wesentlich sind. Der folgende Abschnitt 3.4 adressiert die strukturierte Analyse der entsprechenden Teilsystemeingänge *Elektronenstrahl*, *vorgeheizte Pulverschicht* und *Scanstrategie*.

3.4 Eingänge des Teilsystems Pulverbereiche verfestigen

3.4.1 Analyse der Eingangsgrößen

Analog zur speziellen Betrachtung des Teilsystems *Pulverbereiche verfestigen* (s. o.) bedarf es ebenso einer Fokussierung auf die diesbezüglichen Teilsystemeingänge *Elektronenstrahl*, *vorgeheizte Pulverschicht* sowie *Scanstrategie*. Damit erfolgt eine explizite Konzentration auf die selektive Verfestigung einer Pulverschicht. Dieser Umstand spiegelt sich in der folgenden Analyse und Bewertung wider. Damit wird das Ziel verfolgt, nur relevante Faktoren für die folgenden Untersuchungen zu berücksichtigen bzw. unwichtige auf der Basis von Vorarbeiten auszuschließen.

Elektronenstrahl

Entsprechend den obigen Ausführungen besteht die Kernfunktion des Elektronenstrahlschmelzens in der Verfestigung metallischer Pulverwerkstoffe durch den Energieeintrag eines abgelenkten Elektronenstrahls und die daraus resultierende Temperaturerhöhung. Den Einstellgrößen des *Elektronenstrahls* selbst kommt daher eine wesentliche Bedeutung in Bezug auf das Prozessergebnis zu. Neben der *Strahlleistung* sind in diesem Zusammenhang auch verschiedene *Strahlcharakteristika* zu nennen (vgl. Abbildung 28).

<i>Elektronenstrahl</i>	
Strahlleistung	Strahlcharakteristika
Strahlstrom	Strahlfleckdurchmesser
Beschleunigungsspannung	Fokusslage
	Form des Strahlflecks
	Aperturwinkel
	Intensitätsverteilung

Abbildung 28: Untergliederung der Teilsystemeingänge im Bereich Elektronenstrahl

Nach Gl. (2) in Unterabschnitt 1.3.1 ist die Strahlleistung als das Produkt aus Strahlstrom und Beschleunigungsspannung definiert und damit einstellbar. Der Strahlfleckdurchmesser, d. h. die Größe des ideal kreisförmigen Auftreffbereichs des Elektronenstrahls, sowie die Fokusslage sind hingegen Strahlcharakteristika. Die Fokusslage beschreibt, ob sich der Brennpunkt des Elektronenstrahls oberhalb oder unterhalb der Pulverschicht befindet. Beide Größen sind vom Linsenstrom abhängig und somit einstellbar. In Bezug auf die Form des Strahlflecks kann sich für unterschiedliche Linsenströme ein elliptischer Strahlauftrittsbereich ausbilden. Dieser zumeist unerwünschte Zustand kann im Rahmen der Anlagenkalibrierung nach dem Wechsel der Glühkathode umgangen und es kann durch eine Einstellroutine eine kreisrunde Auftrefffläche sichergestellt werden. Damit gilt, dass die Form des Strahlflecks in bestimmten Grenzen einstellbar ist. Der sog. Aperturwinkel, d. h. der halbe Winkel, unter dem der Strahl in den Strahlfokus eintritt, ist determiniert und hängt von der Dimensionierung der Anlage sowie von Betriebsparametern ab und kann daher nur in engen Grenzen variiert werden (SCHILLER et al. 1977). Für die Intensitätsverteilung trifft dies nur eingeschränkt zu. Durch unterschiedliche Geometrien von Glühkathoden lässt sich dieser Wert zwar beeinflussen. Allerdings können beispielsweise während des Betriebs entstehende Oberflächendefekte der Kathode Störeinflüsse auf die Intensitätsverteilung ausüben (SCHULTZ 2000).

Vorgeheizte Pulverschicht

Den Stoffeingang in das Teilsystem *Pulverbereiche verfestigen* bildet die *vorgeheizte Pulverschicht*. Die dazu gehörigen Aspekte sind das verwendete Pulversystem, die Schichthöhe sowie die Vorheiztemperatur des Werkstoffs. Das Pulversystem wird von verschiedenen Kenngrößen beschrieben. Zuerst ist in diesem Kontext der zugrunde liegende Werkstoff selbst, d. h. die Legierungszusammensetzung, zu nennen. Damit werden verschiedenste physikalische Feststoffeigenschaften, wie beispielsweise das metallurgische Verhalten beim Aufheizen bzw. Abkühlen, determiniert. Durch den Herstellungsprozess des Pulvers bzw. dessen Klassifizierung werden hingegen die Eigenschaf-

ten auf Partikelebene, also die Form und die Durchmesser- und Verteilung der Pulverkörner, festgelegt (vgl. Abbildung 29).



Abbildung 29: Untergliederung der Teilsystemeingänge im Bereich vorgeheizte Pulverschicht

Aus dem Verhältnis der absoluten Dichte des Pulvers ρ_{Pulver} zur absoluten Dichte des kompakten Feststoffs ρ_{kompakt} bestimmt sich entsprechend Gl. (19) die Schüttungsdichte $\rho_{\text{Schüttung}}$.

$$\rho_{\text{Schüttung}} = \frac{\rho_{\text{Pulver}}}{\rho_{\text{kompakt}}} \quad (19)$$

Als weitere partikelbezogene Größe sind die chemischen Eigenschaften zu sehen. Beispielsweise wird die Verunreinigung der Partikeloberflächen durch Oxidablagerungen vor allem durch das Verfahren zur Pulverherstellung sowie durch die Art der Lagerung des Pulvers beeinflusst. Diese Oxidschichten behindern zwar nicht zwangsläufig den Verfestigungsprozess als solchen, führen jedoch u. a. zu Fremdstoffen im Werkstoffgefüge des Bauteils (SIGL et al. 2006). Demgegenüber sind die elektrischen und thermophysikalischen Eigenschaften nicht charakterisierend auf Partikelebene, sondern sie beziehen sich vielmehr auf die gesamte Pulverschicht. In Bezug auf das Pulververblasen sind besonders elektrische Eigenschaften, wie z. B. die Kapazität sowie der elektrische Leitwiderstand zwischen Strahlaufftreffbereich und Erdung, zu nennen (SIGL 2008).

Die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität sowie der Emissionskoeffizient sind dagegen für den thermischen Prozess relevant und beeinflussen die Temperaturverteilung innerhalb der Pulverschicht bei der Bestrahlung. Neben den genannten

Kennwerten des Pulversystems ist ebenso der Zustand der aufgetragenen Pulverschicht während des Prozessablaufs ausschlaggebend. Dies bezieht sich, abgesehen von der einstellbaren Schichthöhe, vor allem auf den Vorheizschritt (vgl. Unterabschnitt 1.3.2) bzw. die dabei erzielte Pulvertemperatur vor dem eigentlichen Verfestigen.

Scanstrategie

Die *Scanstrategie* wird durch das Scanmuster, d. h. die vom Elektronenstrahl beschriebene Ablenkfigur, die Anzahl der Wiederholungen des Energieeintrags mittels Strahl sowie durch die verwendete Scangeschwindigkeit charakterisiert. In Bezug auf das Scanmuster existiert eine Vielzahl an möglichen geometrischen Abmessungen und Richtungen der Scanvektoren zur Beschreibung eines beliebigen Querschnitts. In Analogie zum Laserstrahlschmelzen hat sich beim Elektronenstrahlschmelzen die Zusammensetzung eines komplexen Scanmusters aus mehreren Grundmustern etabliert (vgl. Unterabschnitt 1.5.3). Dafür finden einfache Regelgeometrien konstanter Größe, wie beispielsweise Sechsecke und Quadrate, Verwendung. Diese werden mit Scanvektoren gefüllt, welche zumeist parallel angeordnet sind und sowohl in unterschiedlichen Richtungen als auch in derselben Richtung durchlaufen werden können. Der sog. Hatch-Abstand bezeichnet dabei den Versatz bei der Anordnung o. g. Scanvektoren innerhalb der Grundmuster (vgl. Abbildung 30).

<i>Scanstrategie</i>		
Scanmuster	Anzahl der Wiederholungen	Scangeschwindigkeit
Grundmuster		
Hatch-Abstand		
Richtung der Scanvektoren		
Lage der Grundmuster		
Scanreihenfolge		
Konturverfestigung		

Abbildung 30: Untergliederung der Teilsystemeingänge im Bereich Scanstrategie

Diese Grundmuster können in Bezug auf den gefüllten Querschnitt verschiedene Orientierungen und Positionen aufweisen, wodurch ihre Lage definiert ist. Im Zuge der Verfestigung werden die genannten Regelgeometrien entweder sequenziell oder quasiparallel mit dem Strahl beaufschlagt. Neben einem kontinuierlichen Durchlaufen wird diesbezüglich auch eine stochastische Scanreihenfolge angewendet (vgl. Unterabschnitt 1.5.3). Abschließend besteht die Möglichkeit, die Konturen des aktuellen Bauteilquerschnitts durch gezieltes Verfestigen gegenüber den Bereichen mit losem Pulverwerkstoff abzugrenzen. Das aus den genannten Optionen erzeugte Scanmuster kann zur Ver-

festigung einer Schicht mehrmals wiederholt werden. Dafür wird der Strahlfleck mit einer Scangeschwindigkeit relativ zur Oberfläche der Pulverschicht abgelenkt.

3.4.2 Auswahl relevanter Parameter

Der obige Unterabschnitt 3.4.1 verdeutlicht, dass selbst auf Teilsystemebene eine Vielzahl an Eingangsgrößen den Elektronenstrahlschmelzprozess beeinflussen. Daher muss in der vorliegenden Arbeit eine systematische Eingrenzung der zu untersuchenden Parameter vorgenommen werden. Die damit verbundene Auswahl hat zur Folge, dass nur prioritäre Faktoren im weiteren Verlauf der Arbeit variiert werden und damit deren jeweiliger Einfluss evaluierbar ist. Die darüber hinaus gehenden Eingangsgrößen werden dabei nicht vernachlässigt. Vielmehr verbleiben ihre Werte auf geeigneten Einstellungen konstant. Die Auswahl der zu variierenden Eingangsgrößen basiert auf unterschiedlichen Gesichtspunkten. Zum einen erfolgt im Sinne der Zielsetzung, d. h. der Eliminierung der Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung*, eine Konzentration auf solche Faktoren, die das in Unterabschnitt 1.5.3 definierte Untersuchungsgebiet vorrangig beeinflussen. Beispielsweise soll die Prozessoptimierung durch geänderte Scanmuster weiteren Forschern vorbehalten bleiben. Zum anderen finden bei der Auswahl die Vorarbeiten Dritter Berücksichtigung.

Als weiterer Aspekt wird die Reproduzierbarkeit bei der Durchführung experimenteller Versuchsreihen in Betracht gezogen. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, zwischen unterschiedlichen Manipulationsmöglichkeiten, d. h. frei wählbaren sowie bedingt einstellbaren Prozessparametern und determinierten Kennwerten zu unterscheiden. Frei wählbare Größen zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Betrag mit Hilfe der Steuerung eindeutig vorgegeben werden kann und dass sie in jedem Baujob veränderbar sind. Weitere Eingangsgrößen sind demgegenüber nur bedingt einstellbar. Dies gilt sowohl für die Bereiche der Strahlcharakteristika, die während des Betriebs Störschwankungen unterliegen oder konstruktionsseitig vorgegeben sind, als auch für die Pulvertemperatur, die aus vorgegebenen Größen, wie der eingekoppelten Strahlenergie, hervorgeht. Ihr aktueller Wert kann zwar erfasst, jedoch selbst durch die Implementierung einer Prozessregelung nur in bestimmten Grenzen festgelegt werden. Eine weitere Gruppe stellen Kennwerte dar, die die Eigenschaften des Pulversystems widerspiegeln. Neben grundsätzlichen Faktoren, wie u. a. der Zusammensetzung der Legierung, werden Kennwerte auch durch Störeinflüsse charakterisiert. Beispielsweise kann die oxidierende Atmosphäre während der Lagerung des Pulvers dessen chemische Eigenschaften beeinträchtigen. In Tabelle 1 sind die in Unterabschnitt 3.4.1 aufgeführten Eingangsgrößen in Verbindung mit der obigen Zuordnung zusammengefasst.

Tabelle 1: Auswahlmatrix für das Teilsystem Pulverbereiche verfestigen

		frei wählbare Größe	bedingt einstellbare Größe	determinierter Kennwert	Bewertung (Pulververblasen)	Bewertung (Schmelztropfenbildung und Schichtablösung)
Elektronenstrahl						
Strahlstrom	Strahlleistung	x			1	1
Beschleunigungsspannung		x			1	2
Strahlfleckdurchmesser	Strahlcharakteristik	x			1	2
Fokuslage		x			2	3
Form des Strahlflecks			x		3	3
Aperturwinkel			x		3	3
Intensitätsverteilung			x		2	2
Vorgeheizte Pulverschicht						
Feststoffeigenschaften	Pulversystem			x	2	2
Partikelform				x	1	3
Partikelgrößenverteilung				x	2	3
Schüttungsdichte				x	2	2
chemische Eigenschaften				x	2	3
Wärmeleitfähigkeit				x	2	2
spezifische Wärmekapazität				x	3	2
Emissionskoeffizient				x	3	2
Schichthöhe		x			2	2
Pulvertemperatur			x		1	2
Scanstrategie						
Grundmuster	Scanmuster	x			3	3
Hatch-Abstand		x			3	2
Richtung der Scanvektoren		x			3	3
Lage der Grundmuster		x			3	3
Scanreihenfolge		x			3	3
Konturverfestigung		x			3	3
Anzahl der Wiederholungen		x			3	3
Scangeschwindigkeit		x			2	1
Legende: 1: Einfluss untersucht 2: Einfluss berücksichtigt 3: Einfluss irrelevant						

Vor dem Hintergrund von Abschnitt 1.5 erfolgt eine Bewertung aller Eingangsgrößen hinsichtlich ihrer Relevanz für die Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit. Dementsprechend werden die Zahlen von 1 bis 3 zugeordnet, denen die Bedeutung *Einfluss untersucht*, *Einfluss berücksichtigt* und *Einfluss irrelevant* zugrunde liegt. Die Tatsache, dass eine Eingangsgröße frei wählbar ist, führt dazu, dass die entsprechenden Ergebnisse der Modellierung und Simulation auf direktem Weg für reale Versuche herangezogen werden können. Damit wird die experimentelle Validierung wesentlich erleichtert. Allerdings stellt dies keine Voraussetzung für die Auswahl dar. Für die anschließende Bewertung werden verschiedene Vorarbeiten herangezogen. Diese haben zwar den Einfluss der mit 1 bewerteten Eingangsgrößen identifiziert, jedoch wurden Maßnahmen auf Basis der Modellierung und Simulation zur Unterbindung der drei genannten Fehlerbilder nur sehr begrenzt bzw. überhaupt nicht umgesetzt.

In Bezug auf das Prozessergebnis des Elektronenstrahlschmelzens heben vor allem KAHNERT et al. (2007) die besondere Bedeutung des Strahlstroms hervor. In weiteren Arbeiten zeigt sich überdies die Wirkung der Beschleunigungsspannung auf das Prozessergebnis (SIGL 2008) sowie die günstige Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften und des Gefüges durch eine leichte Defokussierung, d. h. einen vergrößerten Strahlauffreffpunkt (QI et al. 2006). Diese Arbeiten belegen die Zuordnung des Prädikats *Einfluss untersucht* (vgl. Tabelle 1). Gleiches gilt für die Partikelform, denn SIGL et al. (2006) berichten über den günstigen Einfluss spratziger Partikel auf die Unterbindung des Pulververblasens. Im gleichen Zusammenhang führen die Autoren an, dass die Ausbildung von Sinterhälsen zwischen den Pulverpartikeln aufgrund der verbesserten elektrischen Leitfähigkeit und einer mechanischen Fixierung positiv zu sehen ist. Das Vorheizen des Pulvers begünstigt diesen Zustand. Daher wird die Pulvertemperatur mit einer 1 bewertet und im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht. Abschließend betonen vor allem MEINDL (2005) und ZÄH (2007) die Bedeutung einer angepassten Scangeschwindigkeit auf die erzielbare Oberflächengüte der verschmolzenen Schicht, wodurch diese Eingangsgröße ebenfalls zu betrachten ist.

Somit sind alle zu untersuchenden Eingangsgrößen des Teilsystems *Pulverbereiche verfestigen* (vgl. Abbildung 27 unten) definiert. Als konsequente Fortführung des aktuellen Abschnitts werden im Folgenden die Ausgänge des o. g. Teilsystems analysiert.

3.5 Ausgänge des Teilsystems Pulverbereiche verfestigen

3.5.1 Allgemeines

Analog zur Betrachtung der Eingänge in das Teilsystem *Pulverbereiche verfestigen* im Rahmen von Abschnitt 3.4 bedarf es auch einer Untersuchung der entsprechenden Aus-

gänge. In Bezug auf Abbildung 27 (unten) verlassen *Energie, Stoff und Information* das Teilsystem in Form von *gespeicherter Wärme*, der *verfestigten Schicht* sowie des Signals, dass die *Schichtverfestigung beendet* ist. Da mit dem Elektronenstrahlschmelzen die Fertigung dreidimensionaler Bauteile durch die Verbindung aufeinander folgender Feststoffschichten angestrebt wird, ist im Folgenden nur der Ausgang *verfestigte Schicht* relevant. Daher wird, im Gegensatz zu den Eingängen in das Teilsystem *Pulverbereiche verfestigen*, auf eine detaillierte Betrachtung der anderen Ausgänge *gespeicherte Wärme* sowie *Schichtverfestigung beendet* verzichtet.

Aus dem wiederholten Durchlaufen des Teilsystems *Pulverbereiche verfestigen* resultiert als Idealergebnis ein Bauteil aus kompaktem Feststoff. Da dies dem angestrebten Ergebnis entspricht, werden im Folgenden die zu erzielenden Werkstückmerkmale sowie geeignete Messmethoden zur Überprüfung dieser Kenngrößen vorgestellt.

3.5.2 Merkmale eines angestrebten Bauteils

Eine im Elektronenstrahlschmelzen erzeugte Schicht kann verschiedene Ausprägungen hinsichtlich u. a. Ebenheit, Oberflächenrauheit und Verschmelzungsgrad besitzen. Um einen störungsfreien Prozessablauf zu erzielen, muss jedoch sichergestellt werden, dass der Pulverauftrag für die darauf folgende Schicht, beispielsweise durch örtlich begrenzte Erhöhungen, nicht behindert wird. Zum Zweck der Prüfung kann der Bauprozess allerdings nicht kurzfristig unterbrochen werden. Die Entnahme des in der Fertigung befindlichen Bauteils und eine Prüfung außerhalb der Bearbeitungskammer können dazu führen, dass die Fertigung nicht fortgesetzt werden kann. Dies ist insbesondere darin begründet, dass die anlagentechnischen Voraussetzungen des verwendeten Demonstrators, u. a. zum wiederholgenauen Spannen des Werkstücks, dafür nicht gegeben sind. Um die Qualität der aktuellen Schicht bearbeitungsparallel zu prüfen, ist daher gegenwärtig nur eine visuelle Überwachung möglich. Zur umfassenden Untersuchung und Beurteilung des Prozessergebnisses ist es daher zweckmäßig, das Werkstück nach dem Baujob einer geeigneten Untersuchung zuzuführen.

Aus diesem Grund müssen Messgrößen bzw. -verfahren bestimmt werden, mit denen ein erzeugtes Bauteil und damit die zur Fertigung verwendeten Parametereinstellungen beurteilt werden können. Um ein Werkstück ohne das Auftreten der o. g. Fehlerbilder zu erhalten, muss primär ein kompaktes bzw. zusammenhängendes Gefüge vorliegen. Demnach ist die Verbindungsqualität zweier aufeinander folgender Schichten ein wichtiges Kriterium. Zur Bewertung der *schmelzmetallurgischen Schichtverbindung* kommen Verfahren der Metallographie, d. h. insbesondere visuelle Prüfungen von Querschliffen mittels Stereoauflichtmikroskop, zum Einsatz.

Ein weiterer Punkt bezieht sich auf den erzielten Werkstoffaufbau unmittelbar nach dem Bauprozess, d. h. ohne Wärmebehandlung. Hierbei ist vor allem die erzielte relative

Materialdichte maßgeblich. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Wert durch die Eintauchprüfung nach DIN ISO 3369 (1990) ermittelt. Dabei wird der zu testende Messkörper zuerst an Luft und im Anschluss in einer Flüssigkeit gewogen. Durch dieses Vorgehen entfällt die oftmals ungenaue Bestimmung des Messkörpervolumens. Die relative Dichte ρ_{rel} ergibt sich nach DIN ISO 3369 (1990) durch Berechnung (vgl. Gl. (20)) gemäß:

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{\rho_{\text{Messkörper}}}{\rho_{\text{kompakt}}} = \frac{m_{\text{Messkörper}} \cdot \rho_{\text{Flüssigkeit}}}{m_{\text{Flüssigkeit}} \cdot \rho_{\text{kompakt}}} \quad (20)$$

In Gl. (20) bezeichnet $\rho_{\text{Messkörper}}$ die Dichte des Messkörpers und ρ_{kompakt} die Referenzdichte der entsprechenden Legierung ohne Restporosität, d. h. im vollständig kompakten Zustand. Die Variablen $m_{\text{Messkörper}}$ und $m_{\text{Flüssigkeit}}$ stellen die durch Wägen an Luft ermittelte Masse des Messkörpers bzw. die Masse der vom Messkörper beim Wägen verdrängten Flüssigkeit dar. Die Dichte der Flüssigkeit entspricht $\rho_{\text{Flüssigkeit}}$.

Die im Vorangehenden definierten Ausgänge *schmelzmetallurgische Schichtverbindung* sowie *Materialdichte* spiegeln die bauteilbezogenen Ausgangsgrößen des Teilsystems *Pulverbereiche verfestigen* wider. Damit wird im späteren Verlauf der Arbeit beurteilt, ob die Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* erfolgreich eliminiert werden konnten. In Bezug auf das Fehlerbild *Pulververblasen* ist für die Zeilsetzung der Arbeit, d. h. die Vermeidung der Fehlerbilder, nur die Tatsache relevant, ob Pulververblasen aufgetreten ist oder nicht. Da dies visuell ohne Hilfsmittel bewertet werden kann, wird von der Definition eines weiteren Teilsystemausgangs hierfür abgesehen.

3.6 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Durch die Formalisierung des Systems *Elektronenstrahlschmelzen* wurde im vorliegenden Kapitel die Grundlage für die analytische Modellierung des Pulververblasens sowie des thermischen Prozesses geschaffen. Damit geht eine strukturierte Zergliederung in Teilsysteme einher, die ihrerseits durch Ein- und Ausgänge gekennzeichnet sind. Dieser Schritt führte zu einer zielgerichteten Reduktion der Komplexität des betrachteten Teilsystems *Pulverbereiche verfestigen*. Dazu wurden aus einer Vielzahl möglicher Einflussgrößen diejenigen mit der größten Relevanz für die Kernaufgabe des Elektronenstrahlschmelzens, d. h. das Verfestigen von Pulverwerkstoff, identifiziert.

Diese Ergebnisse sind ein wesentlicher Bestandteil der Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens, die zu Beginn von Kapitel 3 vorgestellt wurde. Als weitere Schritte sieht die Methode vor, sowohl das Pulververblasen als auch die thermischen Abläufe während des Elektronenstrahlschmelzens durch die Formulierung mathematischer Beziehungen zu modellieren. Dies ist Gegenstand von Kapitel 4.

4 Analytische Prozessmodellierung

4.1 Allgemeines

Das im vorangehenden Kapitel 3 erstellte theoretische Modell (vgl. Abbildung 27 auf Seite 58) bildet in Verbindung mit der Auswahl relevanter Einflussgrößen die Basis für die analytische Prozessmodellierung des Elektronenstrahlschmelzens. Dafür werden Wirkmechanismen zwischen Eingangsgrößen und dem Prozessergebnis auf einem ingenieurmäßig relevanten Detaillierungsgrad analysiert und mit Hilfe von Gleichungen mathematisch beschrieben. Damit schafft Kapitel 4 die Grundlagen zur Eliminierung der identifizierten Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung*.

Zu diesem Zweck teilt sich die nachfolgende Modellierung in die Abschnitte des Pulververblasens und des thermischen Prozesses auf. Im Fall des Pulververblasens können qualitative Aussagen zur Anwendung in der Praxis unmittelbar getroffen werden. Der thermische Prozess hingegen ist als ursächlich für die Schmelztropfenbildung und die Schichtablösung zu betrachten. Die beschreibenden Gleichungen sind im Zusammenhang mit der mathematischen Formulierung der relevanten Wärmequelle, den temperaturabhängigen Werkstoffkennwerten und den komplexen Anfangs- bzw. Randbedingungen analytisch nicht hinreichend genau zu lösen. Daher schließt sich in Kapitel 5 die Implementierung in eine geeignete Simulationsumgebung an.

4.2 Modellierung des Pulververblasens

4.2.1 Allgemeines

In Abschnitt 2.2 konnte gezeigt werden, dass bereits verschiedene Erklärungsansätze zur Modellierung des Pulververblasens entwickelt wurden. Allen ist dabei gleich, dass die Kraftwirkung auf ein repräsentatives Partikel der Pulverschicht aufgrund verschiedener physikalischer Mechanismen abgeschätzt, mit dessen Gewichtskraft in Bezug gesetzt und damit die jeweilige Bedeutung des untersuchten Effektes bewertet wird. Allerdings zeigt der Stand der Technik auch, dass die gewählten Vorgehensweisen voneinander abweichen. Nichtsdestotrotz ergeben sich die folgenden Erkenntnisse. Einerseits sind thermodynamische Effekte sowie elektrodynamische Vorgänge als Hauptursache für das Pulververblasen weitgehend auszuschließen. Andererseits wurde festgestellt, dass elektrostatische Effekte sowie die Impulsübertragung durch die bewegten Ladungsträger des Elektronenstrahls relevante Kraftwirkungen auf die Partikel ausüben.

Aufgrund der teilweise heterogenen Modellvorstellungen scheint es notwendig, die in Abschnitt 2.2 aufgeführten Ansätze aufzugreifen, weiterführend zu analysieren und ein ganzheitliches Prozessmodell des Pulververblasens zu entwickeln. Im Gegensatz zu der Vorgehensweise im o. g. Abschnitt sollen im Folgenden weder die genannten Kraftwirkungen unter geänderten Annahmen abgeschätzt noch weitere mögliche Ursachen untersucht werden. Der Fokus im aktuellen Kapitel liegt vielmehr darauf, prozessrelevante Einflussgrößen auf die identifizierten Kräfte zu bestimmen. Damit sollen Anpassungen der Prozessführung abgeleitet werden, die geeignet sind, dem unerwünschten Effekt des Pulververblasens entgegenzuwirken.

4.2.2 Versuchsbasierte Untersuchung des Pulververblasens

Bei der Interaktion eines Elektronenstrahls mit Metallen wird ein signifikanter Anteil der mitgeführten Ladung auf den bestrahlten Gegenstand übertragen. Für den Fall, dass dieses Target nicht elektrisch isoliert ist, wird die darin eingebrachte Ladung vollständig an die Erdung abgeführt und es findet kein Aufladevorgang statt (ARDENNE 1962). Dementsprechend liegt am Kabel zwischen Target und Erdung ein sog. Targetstrom an, der beispielsweise mit Hilfe eines digitalen Multimeters gemessen werden kann.

Zur detaillierten Analyse des Pulverblasens kam der folgende Versuchsaufbau zum Einsatz. Mit Hilfe einer zeitlich hoch auflösenden Strommesskarte vom Typ *National Instruments PCI 4070* wurde der über das Erdungskabel der ansonsten vollständig elektrisch isolierten Grundplatte abfließende Targetstrom I_{Target} aufgenommen und mit der Bilderfolge einer Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ *RedLake MotionPro* synchronisiert. Um Störeinflüsse der Messung durch das Pulververblasen auszuschließen, wurde darauf geachtet, dass die o. g. leitende Verbindung zwischen Target und Erdung vom elektrischen Potenzial der restlichen Komponenten (z. B. Klinge und Auftragsmechanismus) isoliert war.

Für den beschriebenen Versuch wurde der Strahlstrom zu $I_B = 1 \text{ mA}$ gesetzt und sein Auftreffpunkt nicht variiert. Um eine Vergleichsmessung zu erhalten, wurden zwei unterschiedliche Eigenschaften der bestrahlten Oberfläche bei ansonsten identischen Randbedingungen gewählt. Zum einen traf der Elektronenstrahl auf die Pulverschicht und zum anderen direkt auf die Oberfläche der Grundplatte. Somit wurde neben dem Targetstrom während des Pulververblasens auch eine Referenzkurve für die ebene Oberfläche des festen Materials aufgenommen (vgl. Abbildung 31).

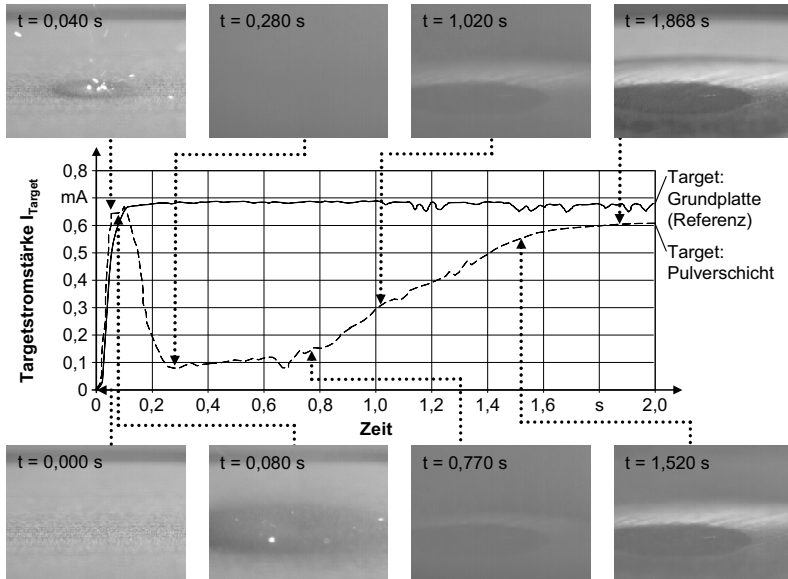


Abbildung 31: Messung des Targetstroms und zeitliche Zuordnung der Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera während des Pulververblasens

Die durchgezogene Linie gibt den Verlauf des Targetstroms beim Auftreffen des Strahls auf die Grundplatte wieder (Target = Grundplatte). Die 10 mm dicke Grundplatte aus Stahl 1.0037 hat einen Durchmesser von 60 mm und die bestrahlte Oberfläche einen arithmetischen Mittelwert der Rauheit von $R_a = 4,10 \mu\text{m}$ bzw. $R_a = 1,40 \mu\text{m}$ (Messstrecke um 90° versetzt). Es bildet sich ein annähernd konstanter Targetstrom von $I_{\text{Target}} \approx 0,69 \text{ mA}$ aus, der erst ab ca. $t = 1,1 \text{ s}$ geringfügig abfällt und größere Schwankungen aufweist. Demgegenüber zeigt der Verlauf von I_{Target} bei der Interaktion des Elektronenstrahls mit der Metallpulverschicht (Target = Metallpulver), d. h. die gestrichelte Linie, ausgeprägte Schwankungen. Nach Erreichen des Maximalwertes von $I_{\text{Target}} \approx 0,67 \text{ mA}$ fällt die Kurve bis auf ca. $0,09 \text{ mA}$ plötzlich ab und steigt ab $0,4 \text{ s}$ (abgesehen von geringen Abweichungen) nahezu kontinuierlich bis zum Ende der Messdauer von $2,0 \text{ s}$ an.

Zusätzlich können der Abbildung 31 Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera entnommen werden. Dabei wurde eine Aufzeichnungsrate von 1000 Bildern pro Sekunde gewählt. Die Bilderreihe startet auf der linken Seite der Grafik im unteren Bereich zum Zeitpunkt $t = 0,000 \text{ s}$, zu dem der Elektronenstrahl auf die Pulverschicht trifft. Nach $0,040 \text{ s}$ ist zu erkennen, wie das Pulver bereits zu verblasen beginnt. Bei $t = 0,280 \text{ s}$ ist in der Aufnahme statt der Pulverschicht nur eine Pulverwolke zu erken-

nen und die Intensität des Pulververblasens hat ihr Maximum erreicht. Zum gleichen Zeitpunkt ist der Targetstrom minimal. Damit liegt die Erklärung nahe, dass der Elektronenstrahl bereits vor dem Auftreffen auf die Grundplatte einen großen Anteil der mitgeführten Ladung durch Kollisionen mit den verblasenen Partikeln über der Grundplatte verliert und daher nur noch ein reduzierter Anteil der eingebrachten Ladung über das Erdungskabel abfließt. Die Differenz zwischen der Nennladung des Elektronenstrahls und der über das Erdungskabel abgeführten Ladungsmenge wird durch die verblasenen Teilchen vom Target wegtransportiert. Diese treffen an anderen Orten innerhalb der Vakuumkammer auf und geben ihre negative elektrische Ladung an die geerdeten Anlagekomponenten wieder ab. Da diese leitende Verbindung zum Erdpotenzial jedoch, wie oben beschrieben, vom Messkabel isoliert ist, wird der darüber abfließende Strom nicht vom o. g. digitalen Multimeter erfasst. Die weiteren Aufnahmen zwischen $t = 0,770$ s und $t = 1,868$ s zeigen, dass die Intensität der Pulverwolke kontinuierlich zurückgeht. Gleichzeitig nimmt die in die Grundplatte eingekoppelte Ladung pro Zeiteinheit wieder zu. Diese Beobachtung korreliert mit dem gemessenen Targetstrom, dessen Werte, wie oben erwähnt, bis zu einem Betrag von $I_{\text{Target}} > 0,6$ mA stetig ansteigen.

4.2.3 Zwei-Phasen-Modell des Pulververblasens

Eine Erkenntnis aus dem oben beschriebenen Versuch ist, dass der zeitliche Versatz zwischen dem Moment des Auftreffens des Strahls auf der Pulveroberfläche und dem Beginn der Pulverbewegung 40 ms beträgt (vgl. Abbildung 31). In diesem Zeitabschnitt werden die Pulverteilchen durch den Elektronenstrahl negativ aufgeladen (ARDENNE 1962). Dabei hängt der Betrag der negativen Ladung der Partikel u. a. entscheidend von den elektrischen Eigenschaften des bestrahlten Materials, wie z. B. der Leitfähigkeit, ab. Des Weiteren richtet sich die Ladung eines Teilchens nach der elektrischen Isolierung zwischen den Partikeln und der Trägeroberfläche (INOYA et al. 1991). Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, den Prozess des Verblasens in einen Aufladevorgang und einen Entladevorgang aufzuteilen (vgl. Abbildung 32).

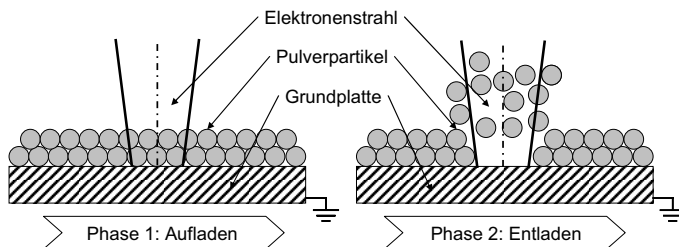


Abbildung 32: Zeitliche Einteilung des Pulververblasens in zwei Phasen

Der Aufladevorgang hält an, solange der Elektronenstrahl auf das Pulverbett trifft und die einzelnen Teilchen sich noch nicht bewegen. Sobald das Pulver wegen des einsetzenden Verblasens nicht mehr direkt vom Strahl beaufschlagt wird, gilt die Modellierung des Entladevorgangs. Im Folgenden werden die Abläufe in den einzelnen Phasen näher untersucht sowie ein Ersatzschaltbild für die besonders relevante Phase 1 *Aufladen* vorgestellt. Das Ergebnis sind beschreibende Gleichungen für die relevanten Kräfte, die Aussagen darüber ermöglichen, welche Einflussgrößen wirksam sind.

4.2.3.1 Aufladephase

Analyse

Aufgrund äußerst kleiner Kontaktflächen zwischen den einzelnen Partikeln weisen Metallpulversysteme bei Raumtemperatur im Allgemeinen einen sehr hohen elektrischen Leitwiderstand auf (INOYA et al. 1991). Dieser Widerstand wird am Übergang zwischen Pulverschicht und Grundplatte durch deren besonders glatte Oberfläche nochmals gesteigert, da hier wesentlich weniger Kontaktstellen zu den Partikeln vorhanden sind (SIGL et al. 2006). Dies führt dazu, dass die eingebrachte Ladung nur langsam über die geerdete Grundplatte abgeführt werden kann und folglich lange im Pulverbett bzw. an den Partikeloberflächen aufrecht erhalten bleibt. Aus diesem Grund wird das Pulverbett elektrotechnisch als Parallelschaltung eines Widerstandes und einer Kapazität modelliert (KORIES & SCHMIDT-WALTER 2004). In Abbildung 33 ist hierzu das idealisierte Ersatzschaltbild für das System *Elektronenstrahl-Pulver-Grundplatte* dargestellt.

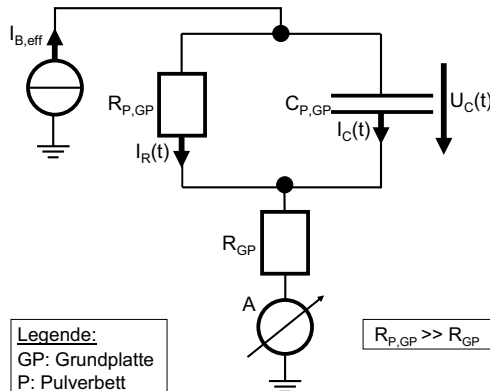


Abbildung 33: Ersatzschaltbild für das System *Elektronenstrahl-Pulver-Grundplatte* während des Aufladevorgangs

Durch den Elektronenstrahl mit dem Strom I_B wird, abzüglich der während des Auftreffvorgangs reflektierten Ladungsträger, der effektive Strom $I_{B,eff}$ in das System eingebracht. Die oben beschriebene Parallelschaltung des Widerstands sowie der Kapazität von Pulverbett und dem Übergang zur Grundplatte $R_{P,GP}$ und $C_{P,GP}$ ist mit dem Widerstand R_{GP} der Grundplatte in Reihe geschaltet. Damit wird ausgedrückt, dass die Ladungsträger (Elektronen) zunächst das Pulver auf der Grundplatte sowie den Übergang zwischen beiden passieren und anschließend über die Grundplatte zur Erdung abfließen müssen. Die Kapazität $C_{P,GP}$ wird dabei wie ein Plattenkondensator mit dem Pulverbett als negativ geladener und der Grundplatte als positiv geladener Kondensatorelektrode aufgefasst. Der elektrische Widerstand $R_{P,GP}$ ist dabei, wie oben beschrieben, erheblich größer als R_{GP} (SIGL 2008).

Für das in Abbildung 33 gezeigte Ersatzschaltbild gilt nach KORIES & SCHMIDT-WALTER (2004) die folgende Gl. (21):

$$U_C(t) = I_{B,eff} \cdot R_{P,GP} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{P,GP} \cdot C_{P,GP}}\right) \right) \quad (21)$$

Dabei entspricht U_C der Spannung an der Kapazität $C_{P,GP}$. Der Gl. (21) ist zu entnehmen, dass U_C mit der Zeit t ansteigt und gegen den konstanten Wert $I_{B,eff} \cdot R_{P,GP}$ strebt. Durch die Kenntnis von U_C ist es möglich, die Kraftwirkung auf das Pulver aufgrund elektrostatischer Abstoßung zu bestimmen. Dazu wird im Folgenden zunächst die Ladung der Partikel abgeschätzt.

Kraftwirkung auf das Pulver aufgrund elektrostatischer Abstoßung

Aus der allgemeinen Definition der Kapazität gilt für die Ladung (CUTNELL & JOHNSON 2009):

$$Q_C(t) = C_{P,GP} \cdot U_C(t) \quad (22)$$

Werden Gl. (21) und Gl. (22) kombiniert, so ergibt sich für $Q_C(t)$ an der Kapazität $C_{P,GP}$:

$$Q_C(t) = C_{P,GP} \cdot I_{B,eff} \cdot R_{P,GP} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{P,GP} \cdot C_{P,GP}}\right) \right) \quad (23)$$

Unter der Annahme, dass sich Q_C gleichmäßig über das aus n_P Partikeln bestehende Pulverbett verteilt, berechnet sich die zeitabhängige Ladung eines einzelnen Pulverteilchens $Q_P(t)$ mit Gl. (23) nach:

$$Q_P(t) = \frac{Q_C(t)}{n_P} = \frac{C_{P,GP} \cdot I_{B,eff} \cdot R_{P,GP}}{n_P} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{R_{P,GP} \cdot C_{P,GP}}\right) \right) \quad (24)$$

Aufgrund der elektrostatischen Wechselwirkungen eines geladenen Partikels mit anderen Komponenten des Systems *Elektronenstrahl-Pulver-Grundplatte* erfährt das Pulverteilchen unterschiedliche Krafteinflüsse nach dem Coulombschen Gesetz (STÖCKER 2007). Hierbei sind zunächst die Abstoßungskräfte zu nennen, welchen ein Pulverpartikel durch seine Interaktion mit einer Vielzahl weiterer, gleichnamig geladener Teilchen in der Pulverschicht ausgesetzt ist. Bezug nehmend auf Gl. (8) setzt sich diese Abstoßungskraft $F_{P,P}$ aus vielen Einzelkomponenten, wie die folgende Gl. (25) verdeutlicht, zusammen. Darin bezeichnen die Variable ϵ_0 die elektrische Feldkonstante mit dem Wert $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C/(Vm)}$ (STÖCKER 2007) und $r_{i,j}$ den Abstand zwischen dem betrachteten Pulverpartikel i und einem beliebigen weiteren Teilchen j .

$$F_{P,P}(t) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^{n_P-1} \frac{Q_P^2(t)}{r_{i,j}^2} \quad (25)$$

Nach SCHILLER et al. (1977) gilt für die Geschwindigkeit der Strahlelektronen v_e bei einer konstanten Beschleunigungsspannung U_A und der Elementarladung q , der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 sowie der Ruhemasse eines Elektrons m_0 :

$$v_e = c_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{q \cdot U_A}{m_0 \cdot c_0^2}\right)^2}} = \text{konst.} = \frac{h_K}{\Delta t} \quad (26)$$

In obiger Gl. (26) bezeichnet die Variable h_K den Abstand zwischen Pulverschicht und Kammerdecke. Nach Unterabschnitt 4.2.2 wird während des transienten Vorgangs des Pulververblasens der Elektronenstrahl weder hinsichtlich seiner Leistung noch örtlich variiert. Dementsprechend ist der Strahlstrom I_B konstant und der Elektronenstrahl trifft senkrecht auf die Pulverschicht. Unter Vernachlässigung des Aperturwinkels gilt:

$$I_B = \frac{dQ_B}{dt} = \text{konst.} = \frac{\Delta Q_B}{\Delta t} \quad (27)$$

Daraus folgt unter Berücksichtigung von Gl. (26) die zeitlich konstante Strahlladung:

$$\Delta Q_B = I_B \cdot \frac{h_K}{v_e} = I_B \cdot \frac{h_K}{c_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{q \cdot U_A}{m_0 \cdot c_0^2}\right)^2}}} \quad (28)$$

Damit ergibt sich für die elektrostatische Abstoßungskraft zwischen dem Strahl und einem ebenfalls negativ geladenen Pulverteilchen i mit dem Abstand $r_{B,i}$ zur Strahlachse die folgende Gl. (29):

$$F_{B,P}(t) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{\Delta Q_B \cdot Q_P(t)}{r_{B,i}^2} \quad (29)$$

Die Grundplatte lädt sich positiv und betragsmäßig identisch zur Pulverschicht, d. h. mit dem Wert Q_C , auf (Kirchhoff'sche Gleichung, vgl. u. a. FLEGEL et al. 2004). Zusätzlich zu den beiden erstgenannten Abstoßungskräfte nach Gl. (25) und Gl. (29) herrscht während des Aufladevorgangs dadurch zwischen der Grundplatte als positiv und dem Pulverbett als negativ geladener Kondensatorplatte eine elektrostatische Anziehungskraft $F_{GP,P}$:

$$F_{GP,P}(t) = -\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_C \cdot Q_P(t)}{r_{GP,i}^2} \quad (30)$$

In obiger Gl. (30) bezeichnet $r_{GP,i}$ den Abstand zwischen einem beliebigen Teilchen i der Pulverschicht und dem Zentrum der Grundplatte, in welchem Q_C als konzentriert betrachtet wird.

Kraftwirkung auf das Pulver aufgrund des Elektronenstrahldrucks

Über die o. g. elektrostatischen Wechselwirkungen hinaus wirkt auf die Pulverpartikel im Auftreffbereich eine Kraft aufgrund der Impulsübertragung der bewegten Strahlelektronen (vgl. Abschnitt 2.2). Entsprechend QI et al. (2006) kann diese Kraft dazu führen, dass die getroffenen Pulverpartikel die angreifenden Reibungskräfte überwinden und vom auftreffenden Strahl beschleunigt werden. Nach CRAWFORD (1962) lässt sich die Strahlimpulskraft F_B wie folgt abschätzen (vgl. Gl. (31)):

$$F_B = m_0 \cdot v_e \cdot \frac{I_B}{q} \quad (31)$$

Unter Berücksichtigung von Gl. (26) folgt daraus:

$$F_B = m_0 \cdot c_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{q \cdot U_A}{m_0 \cdot c_0^2}\right)^2}} \cdot \frac{I_B}{q} \quad (32)$$

Die wirkende Kraft verteilt sich auf den kreisförmigen Strahlauftreffbereich A_B mit dem Durchmesser d_B . Daraus lässt sich der Elektronenstrahldruck p_B auf die beaufschlagten Pulverpartikel wie folgt berechnen:

$$p_B = \frac{F_B}{A_B} = \frac{4 \cdot I_B \cdot m_0 \cdot c_0}{q \cdot d_B^2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{q \cdot U_A}{m_0 \cdot c_0^2}\right)^2}} \quad (33)$$

Überlagerung der wirkenden Kräfte auf das Pulver

Während der Aufladephase treten die elektrostatischen Abstoßungs- bzw. Anziehungskräfte nach Gl. (25), (29) und (30) auf ein beliebiges Pulverpartikel in Erscheinung. Hinzu kommt ein Elektronenstrahl Druck im Auftreffbereich nach Gl. (33). Es entsteht eine Überlagerung, die dazu führt, dass die Kraftwirkung auf die Pulverpartikel im Strahlauftreffbereich maximal wird und die Schicht an diesem Ort zu verblasen beginnt. Diese Hypothese wird von der Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Unterabschnitt 4.2.2 gestützt. Dort ist beschrieben, dass sich beim Verblasen die Pulverpartikel von der Mitte des Strahls ausgehend in radialer Richtung ausbreiten und zusätzlich in vertikaler Richtung beschleunigt werden. In der Folge wird das Pulver nicht mehr direkt vom Strahl getroffen und das in Abbildung 33 gezeigte Ersatzschaltbild zur Modellierung des Aufladevorgangs besitzt keine Gültigkeit mehr.

4.2.3.2 Entladephase

Die Entladephase des Verblasens ist vor allen Dingen dadurch gekennzeichnet, dass das Pulver nicht mehr auf der Grundplatte ruht, sondern sich zunehmend in vertikaler und radialer Richtung ausbreitet. Wie oben erwähnt, kollidieren die beschleunigten Partikel dabei zunächst mit den Strahlelektronen und kommen außerhalb der Grundplatte zum Liegen. In Höhe der Bauebene trifft der Elektronenstrahl daher nicht länger auf die Pulverschicht, sondern koppelt seine Ladung direkt in die geerdete Grundplatte ein.

Wie für den Entladevorgang eines Kondensators üblich, erfolgt ein Ausgleich der zuvor gegensätzlich geladenen Elektroden. Da das Pulver verbläst, geht der negativ geladenen Elektrode und damit dem System *Elektronenstrahl-Pulver-Grundplatte* Ladung verloren, d. h. Q_C wird vor allem durch diesen Effekt geringer. Die Strahlelektronen, die trotz ihrer Kollision mit den verblasenen Pulverpartikeln in die Grundplatte eingebracht werden, bewirken wegen $R_{P,GP} \gg R_{GP}$ einen direkten Ladungsabfluss in die Erdung bzw. werden zum Ausgleich der positiv geladenen Grundplatte aufgebracht. Zusammenfassend folgt daraus, dass in der Entladephase keine weitere elektrostatische Aufladung der verbleibenden Pulverschicht stattfindet und der Betrag von Q_P somit vollständig während der Aufladephase determiniert wird.

Im Gegensatz zur Aufladephase ist die Formulierung eines Ersatzschaltbildes für die Entladephase aufgrund des äußeren Einflusses der Pulverausbreitung und des damit einhergehenden zeitabhängigen Verlaufs von $R_{P,GP}$ bzw. $C_{P,GP}$ wesentlich komplexer. Hinzu kommt, dass in der Entladephase das Pulververblasen bereits eingesetzt hat. Da die Zielsetzung darin liegt, das Auftreten des Pulververblasens zu unterbinden, ist die Formulierung von Gegenmaßnahmen ausschließlich für die Aufladephase möglich und sinnvoll. Von einer weiteren Untersuchung der Entladephase wird daher abgesehen.

4.2.4 Schlussfolgerungen

Basisgrößen

Die quantitative Vorhersage von Prozessparametern zur Vermeidung des Pulververblasens erscheint äußerst komplex, da zur exakten Bestimmung die Gesamtzahl aller vorhandenen Pulverpartikel sowie ihre jeweiligen Eigenschaften hinsichtlich ihre Geometrie, Größenverteilung und elektrischen Eigenschaften etc. in die Berechnungen mit einbezogen werden müssen. Als Ergebnis der hier vorgestellten Modellierung werden daher Abschätzungen in Bezug auf mögliche Eingangsfaktoren getroffen, die im Rahmen von Kapitel 6 experimentell mit praxisrelevanten Parameterwerten verifiziert werden.

Ein wesentlicher Aspekt der vorhergehenden Unterabschnitte 4.2.3.1 und 4.2.3.2 ist die zeitliche Unterteilung des Pulververblasens hinsichtlich der Auf- und Entladephase. Die Kraftwirkungen auf die Pulverschicht werden im erstgenannten Unterabschnitt der für das Vermeiden des Verblasens relevanten Aufladephase zugeordnet sowie in Bezug auf ein beliebiges bzw. repräsentatives Partikel mathematisch formuliert. Wie bereits beschrieben, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die während der Aufladephase wirksamen Kraft- und Druckkomponenten bzw. die zugeordneten Basisgrößen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Analyse der Kraft- bzw. Druckwirkungen und der ursächlichen Basisgrößen

Größe	Gl.	Bezeichnung	Basisgrößen
$F_{P,P}$	(25)	Elektrostatische Kraft (Partikel-Partikel)	$R_{P,GP}, C_{P,GP}, I_B, r_{i,j}, n_P$
$F_{B,P}$	(29)	Elektrostatische Kraft (Strahl-Partikel)	$R_{P,GP}, C_{P,GP}, I_B, U_A, h_K, r_{B,i}, n_P$
$F_{GP,P}$	(30)	Elektrostatische Kraft (Grundplatte-Partikel)	$R_{P,GP}, C_{P,GP}, I_B, r_{GP,i}, n_P$
p_B	(33)	Elektronenstrahl Druck	I_B, U_A, d_B

Mit Basisgrößen werden in diesem Zusammenhang Variablen bezeichnet, die direkt oder indirekt Einfluss auf die beschreibenden Gleichungen der Kraft- bzw. Druckkomponenten besitzen. Der elektrische Widerstand $R_{P,GP}$ und die Kapazität $C_{P,GP}$ des Systems *Pulver-Grundplatte* sowie der Strahlstrom I_B treten besonders häufig in Erscheinung. Der besseren Übersichtlichkeit wegen wird in o. g. Tabelle $I_{B,eff}$ auf die Basisgröße I_B reduziert, da eine Veränderung von I_B bei ansonsten identischen Bedingungen unmittelbar zu einer dazu proportionalen Änderung von $I_{B,eff}$ führt. Des Weiteren sind die Beschleunigungsspannung U_A und der Strahlfleckdurchmesser d_B von Bedeutung.

Aus Gl. (29) geht hervor, dass der Größe h_K , d. h. dem Abstand zwischen Pulverschicht und Kammerdecke in Richtung des Elektronenstrahls, ebenfalls ein Einfluss zukommt.

Um diese Wirkung quantifizieren zu können, sind weiterführende Betrachtungen, z. B. mit Hilfe von Simulationswerkzeugen, experimentellen Ansätzen und damit baulichen Änderungen an der Anlage vorzuziehen.

Tabelle 2 enthält noch weitere Basisgrößen. Bei den Größen $r_{i,j}$, $r_{B,i}$ und $r_{GP,i}$ handelt es sich um den Abstand zwischen einem beliebigen Pulverpartikel i und einem weiteren Partikel j , um den Abstand des o. g. Pulverpartikels i zur Strahlachse sowie um den Abstand eines beliebigen Partikels i in der Pulverschicht zum Zentrum der Grundplatte. Diese Größen dienen in den Gl. (25), (29) und (30) zur Abschätzung der Kraftwirkung und beziehen sich stets auf ein exemplarisches Pulverpartikel. Demnach stellen sie keine Eigenschaftsgrößen der Pulverschicht dar und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Analog hierzu ist n_P nicht als veränderbare Eingangsgröße, sondern vielmehr als Proportionalitätsfaktor zu verstehen. Steigt die Anzahl der Partikel n_P bei ansonsten identischen Bedingungen, so erhöht sich neben dem Widerstand $R_{P,GP}$ auch die Kapazität $C_{P,GP}$. Damit kann in Konsequenz ein größerer Betrag an Ladung im Pulverbett gespeichert werden.

Eingangsgrößen

Die Vielzahl an möglichen Einflussgrößen auf das Elektronenstrahlschmelzen bedingt eine Eingrenzung der zu untersuchenden Faktoren. Dementsprechend wurde in Unterabschnitt 3.4.2 die Auswahl an technologisch relevanten Eingangsgrößen vorgenommen. Diese Parameter werden im Verlauf der Arbeit variiert, um deren jeweilige Bedeutung für das Pulververblasen zu identifizieren. Diesbezüglich mussten die oben gefundenen Basisgrößen zugeordnet werden, um die in Kapitel 6 beschriebenen geeigneten Vergleichsversuche durchführen zu können. Tabelle 3 zeigt den Zusammenhang zwischen den o. g. relevanten Basisgrößen und den ausgewählten Eingangsgrößen.

Tabelle 3: Zusammenhang zwischen relevanten Basisgrößen und Eingangsgrößen

Basisgröße	Bezeichnung	Zugeordnete Eingangsgrößen
I_B	Strahlstrom	Strahlstrom
U_A	Beschleunigungsspannung	Beschleunigungsspannung
d_B	Strahlfleckdurchmesser	Strahlfleckdurchmesser
$R_{P,GP}$	Elektrischer Widerstand des Systems <i>Pulver-Grundplatte</i>	Partikelform, Vorheiztemperatur
$C_{P,GP}$	Kapazität des Systems <i>Pulver-Grundplatte</i>	Partikelform, Vorheiztemperatur

Für den Strahlstrom I_B , die Beschleunigungsspannung U_A sowie den Strahlfleckdurchmesser d_B ist die eindeutige Zuordnung einer Eingangsgröße nach Unterabschnitt 3.4.2 möglich. Den Basisgrößen $R_{P,GP}$ und $C_{P,GP}$ stehen hingegen keine unmittelbaren Ein-

gangsgrößen gegenüber. Jedoch erklärt sich der beträchtliche elektrische Widerstand des Systems *Pulver-Grundplatte* durch die kleinen Kontaktstellen zwischen den einzelnen Pulverpartikeln und der Grundplatte (vgl. Unterabschnitt 4.2.3.1). Diesbezüglich wird von SIGL et al. (2006) neben einer entsprechenden Dimensionierung der Grundplatte sowie einer ausreichenden Erdung auch die Anpassung von ausgewählten Prozessparametereinstellungen zur Unterbindung des Pulververblasens vorgeschlagen. In diesem Zusammenhang werden in Abschnitt 2.2 die Anpassung der Partikelform sowie die Erhöhung der im Vorheizschritt erzielten Pulvertemperatur angeführt. Durch die damit verbundene zahlen- bzw. flächenmäßige Vergrößerung der Kontaktbereiche zwischen den Partikeln geht eine Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit einher. Die Beziehung zwischen der elektrischen Leitfähigkeit χ und der Wärmeleitfähigkeit λ wird durch das in Gl. (34) genannte *Wiedemann-Franz-Gesetz* (STÖCKER 2007) beschrieben:

$$\frac{\lambda}{\chi} = L \cdot T \quad (34)$$

Daraus geht hervor, dass bei konstanter Temperatur T die elektrische Leitfähigkeit χ und die Wärmeleitfähigkeit λ mit der Lorenz-Zahl $L = 2,23 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$ zueinander proportional sind (STÖCKER 2007). Beispielsweise besitzen gute Stromleiter wie Kupfer gleichzeitig auch gute Wärmeleitungseigenschaften. Als ursächlich dafür ist zu sehen, dass in Metallen überwiegend die Leitungselektronen zur Übertragung der Energie von wärmeren zu kälteren Gebieten eines Körpers beitragen (STROPPE 2003). Im folgenden Abschnitt 4.3 wird detailliert auf die ausgeprägte Temperaturabhängigkeit von λ des Pulverwerkstoffs eingegangen.

Die Kapazität des Systems *Pulver-Grundplatte* unterliegt ähnlichen Einflüssen wie der elektrische Widerstand. Im Rahmen der Betrachtung wird daher die Basisgröße $C_{P,GP}$ durch die Eingangsgrößen *Partikelform* sowie *Vorheiztemperatur* abgebildet. Als Ersatzvorstellung für die Pulverpartikel wird eine leitende Kugel mit dem Radius R_K gewählt. Nach CUTNELL & JOHNSON (2009) kann dieser Körper mit der Kapazität C_K (s. Gl. (35)) eine elektrische Ladung vom Betrag Q_K auf seiner Oberfläche speichern.

$$C_K = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot R_K \quad (35)$$

Aus Gl. (35) folgt, dass das Fassungsvermögen eines Leiters für elektrische Ladungen bei einer bestimmten Spannung mit seiner Oberfläche steigt. Aus der Forderung, die Kapazität $C_{P,GP}$ möglichst gering zu halten, folgt, dass die freien Oberflächen des Pulverwerkstoffs zu reduzieren sind. Wie Unterabschnitt 4.3.7 zeigt, vergrößern sich die Kontaktflächen während des Aufschmelzprozesses. In der Konsequenz nimmt der Anteil der freien Oberflächen der Pulverpartikel bei einer Temperaturerhöhung stetig ab (vgl. Abbildung 43). Dieser Zusammenhang verdeutlicht die Reduktion der Kapazität $C_{P,GP}$ durch die Steigerung der Pulvertemperatur im Vorheizschritt.

Diese Ausführungen schließen die Modellierung des Pulververblasens im Rahmen der vorliegenden Arbeit ab. Als Ergebnis steht nun die Modellvorstellung der Auflade- bzw. Entladephase zur Verfügung, mit deren Hilfe vorrangige Einflussgrößen auf das Pulververblasen gezielt bestimmt werden konnten. Der weitere Verlauf der Arbeit adressiert zunächst die Modellierung der thermischen Abläufe des Elektronenstrahlschmelzens, die nach dem Stand der Erkenntnisse (vgl. Unterabschnitte 2.3 sowie 2.4) als ursächlich für die Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* zu erachten sind.

4.3 Modellierung des thermischen Prozesses

4.3.1 Allgemeines

Die Temperaturerhöhung der Pulverpartikel durch den Elektronenstrahl ist die wesentliche Voraussetzung für den Schmelzvorgang. Parallel hierzu laufen noch weitere Wärmetransportvorgänge innerhalb der Prozesszone und über die Grenzen selbiger hinweg ab. Um alle Arten von thermisch relevanten Vorgängen zu berücksichtigen, bietet es sich an, eine Bilanzierung für den betrachteten Bereich vorzunehmen. Darin werden alle Wärmeströme, -quellen und -senken erfasst, die im Weiteren zur korrekten Bestimmung der aktuellen Temperaturen benötigt werden.

Darauf basierend wird die für das Elektronenstrahlschmelzen spezifische Wärmeleitungsgleichung formuliert, wobei zusätzlich die Werkstoffeigenschaften sowie die Anfangs- und Randbedingungen Berücksichtigung finden. Da sich Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität bei Pulverwerkstoffen in Abhängigkeit der Temperatur erheblich von den Werten ihrer entsprechenden Feststoffe unterscheiden, bedarf es zusätzlich deren Modellierung. Das heißt, das Werkstoffverhalten muss im Hinblick auf die o. g. Kennwerte untersucht und ihr Verlauf über der Temperatur mathematisch ausgedrückt werden.

Auf diese Weise werden sämtliche beschreibenden Gleichungen des stationären Temperaturfeldes beim Elektronenstrahlschmelzen bestimmt und der in Kapitel 5 beschriebenen geeigneten numerischen Lösung zugeführt.

4.3.2 Prozessphasen des Elektronenstrahlschmelzens

Den Untersuchungen liegt ein einfaches Scanmuster zugrunde, welches sowohl in marktüblichen Anlagen als auch in Systemen für Forschungszwecke zum Einsatz kommt. Dabei wird der Strahl unidirektional mit einem definiertem Spurb Abstand, dem sog. Hatch-Abstand, zwischen den parallelen Schmelzspuren über das Pulverbett geführt. Dadurch ist der Strahlauffebereich zu der einen Seite von Pulver, zur anderen

Seite von bereits aufgeschmolzenem und wieder verfestigtem Material der vorangehenden, parallelen Schmelzspur umgeben (vgl. Abbildung 34).

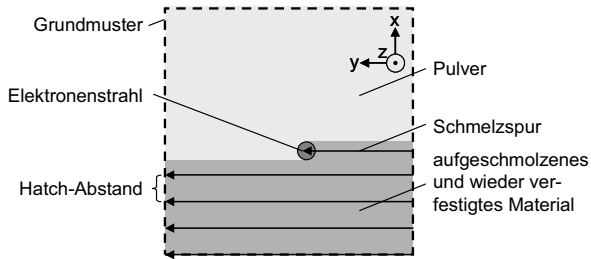


Abbildung 34: Quadratisches Grundmuster zur Pulververfestigung (Draufsicht)

Wie bereits erwähnt, zeichnet sich das Elektronenstrahlschmelzen u. a. durch die Realisierbarkeit einer sehr schnellen Ablenkung des Strahles beim Scannen, d. h. der Beaufschlagung des Pulvers mit Energie, aus. Damit geht einher, dass der Strahlauffebereich nur ausgesprochen kurz auf einer Stelle verbleibt. Zum besseren Verständnis scheint es daher notwendig, den transienten Prozess des Aufschmelzens und Abkühlens in diskrete Zeitschritte zu unterteilen und zur besseren Differenzierung jeder Phase einen charakteristischen Zustand zuzuordnen (vgl. Abbildung 35).

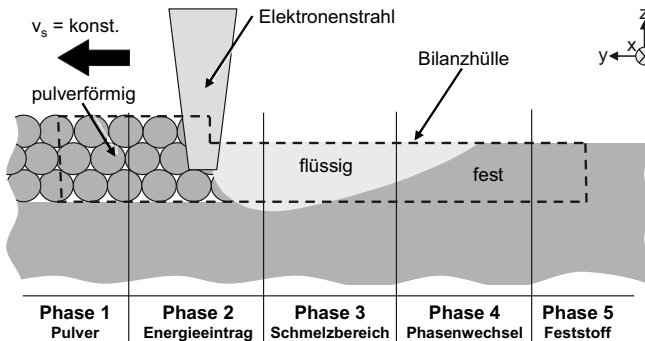


Abbildung 35: Schema der Prozesszone mit Bilanzhülle

Der gezeigten Schnittdarstellung durch das Pulverbett und den verfestigten Bereich liegt zugrunde, dass der Strahl mit konstanter Geschwindigkeit v_s entlang der y-Achse in positiver Richtung bewegt wird. Bis zur Verfestigung des Pulvers bilden sich die folgenden fünf nacheinander ablaufenden Phasen aus:

- 1. Phase: Das Pulver liegt zur Vermeidung des Verblasens in einem vorgeheizten Zustand vor (vgl. Abschnitt 2.2).

- 2. Phase: Der Elektronenstrahl scannt die Pulverschicht. Die Strahlenergie steht, abzüglich verfahrenstechnischer Verluste, bei der Einkopplung in den Werkstoff zur Temperaturerhöhung des Materials zur Verfügung.
- 3. Phase: Durch die Temperaturzunahme des Pulvers steigt die Dichte des Materials an. Es sinkt ab und tritt in die flüssige Phase über.
- 4. Phase: Die Temperaturen nehmen ab und das Material durchläuft einen Phasenwechsel bis zur Erstarrung.
- 5. Phase: Die Verfestigung ist abgeschlossen und das Material kühlt weiter ab.

Die zweite Phase ist für das Elektronenstrahlschmelzen besonders charakteristisch, da die Strahlenergie eingekoppelt wird und alle folgenden Phasen dadurch wesentlich beeinflusst werden.

4.3.3 Wärmebilanz

Wie Abbildung 35 zu entnehmen ist, bietet es sich zur systematischen Berücksichtigung aller auftretenden Wärmeströme, Wärmequellen und -senken an, eine Bilanzhülle um die Prozesszone des Elektronenstrahlschmelzens zu definieren. Diese Bilanzhülle erstreckt sich in x-Richtung um die Breite des Strahldurchmessers d_B , in y-Richtung um die Abmessungen der Prozesszone von Phase 1 bis Phase 5 (s. o.) sowie in z-Richtung um die Höhe einer Pulverschicht (vgl. Abbildung 36).

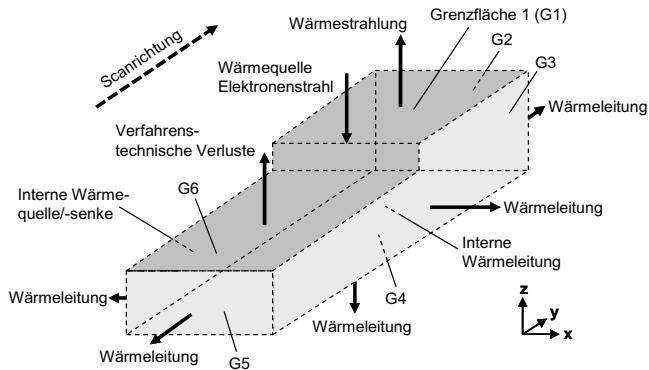


Abbildung 36: Bilanzhülle mit thermisch relevanten Größen für das Elektronenstrahlschmelzen ($G...$ = Grenzfläche)

Neben dem Elektronenstrahl als Wärmequelle treten an der oberen xy-Grenzfläche G1 auch verfahrenstechnische Verlustleistungen in Erscheinung. Diese setzen sich aus Rückstreuelektronen, Röntgenstrahlen, verdampften Atomen sowie der Wärmestrahlung zusammen (vgl. Unterabschnitt 1.3.1). Da der gesamte Prozess im Vakuum abläuft und

somit keine signifikante Menge an Gas in der Bearbeitungskammer vorhanden ist, werden konvektive Effekte ausgeschlossen. Die nur kurzzeitig vorhandene Schmelze wird in diesem Zusammenhang vernachlässigt (WAGNER 2003). An den Grenzfläche G2 bis G6 besteht ein direkter Kontakt zum umgebende Material, wodurch Wärmeleitung aus der Prozesszone ermöglicht wird. Zusätzlich müssen die auftretenden Phasenumwandlungen im Werkstoff (z. B. beim Schmelzen und Abkühlen) als innere Wärmequellen bzw. -senken berücksichtigt werden. Diese Größen werden im Folgenden ausführlich untersucht, um eine möglichst exakte Abbildung des Prozesses zu erreichen.

4.3.4 Wärmeleitungsgleichung für das Elektronenstrahlschmelzen

Eine Temperaturdifferenz ist die treibende Ursache für einen Wärmestrom. Tritt, wie beispielsweise beim Elektronenstrahlschmelzen, eine starke lokale Temperaturerhöhung durch den eindringenden Elektronenstrahl auf, so resultiert daraus eine Wärmeübertragung in Richtung niedrigerer Temperaturen durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion (BAEHR & STEPHAN 1998). Speziell für das Elektronenstrahlschmelzen sind die Wärmeleitung sowie die Wärmestrahlung von Bedeutung, da praktisch die gesamte in Wärme umgewandelte Energie des Elektronenstrahls durch diese Mechanismen übertragen wird. Wärmeleitung innerhalb des Feststoffs tritt in einzelnen Pulverpartikeln, im Schmelzbad und im bereits verfestigten Bereich auf. Im Gegensatz dazu ist die Wärmeübertragung an den äußerst kleinen punkt- bzw. linienförmigen Kontaktstellen zwischen zwei Pulverpartikeln, zwischen Pulverpartikeln und verfestigter Schicht sowie zwischen der Schmelze und den Pulverpartikeln wesentlich komplexer. Um diese Komplexität zu beherrschen, wird das Pulvermaterial in der Bilanzhülle als Werkstoffkontinuum betrachtet, dessen Wärmeleitfähigkeit mit einem effektiven Wert, der pulverspezifische Vorgänge berücksichtigt, im weiteren Verlauf der Arbeit beschrieben wird.

Die Kenntnis des Prozessablaufs sowie die Analyse der Wärmebilanz befähigen zur Definition einer verfahrensspezifischen Wärmeleitungsgleichung, bei welcher sich Randbedingungen, wie z. B. Wärmequellen und -senken, mit Hilfe zusätzlicher Terme ausdrücken lassen. Unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Stoffwerte ergibt sich nach BAEHR & STEPHAN (1998) die folgende Gl. (36):

$$\rho(T) \cdot c(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T) \cdot \text{grad}T] + \dot{W}(x, y, z, t) \quad (36)$$

In dieser Differentialgleichung bezeichnet \dot{W} die durch den Elektronenstrahl gegebene Wärmequelle, $c(T)$ die spezifische Wärmekapazität sowie $\rho(T)$ die Dichte. Da der Werkstoff während des Prozesses nicht nur verschiedene Phasen durchläuft, sondern zusätzlich seine anfängliche Pulvergestalt verliert, wird ersichtlich, dass sich die Materialgrößen $c(T)$, $\rho(T)$ und $\lambda(T)$ in Abhängigkeit der Temperatur ändern. Um Gl. (36) lösen und damit das instationäre Temperaturfeld in der Prozesszone (vgl. Abbildung 36) be-

stimmen zu können, müssen die Anfangs- und Randbedingungen formuliert und die Ausdrücke \dot{W} , $p(T)$, $c(T)$ und $\lambda(T)$ in den folgenden Unterabschnitten analysiert bzw. mathematisch beschrieben werden. Bei obiger Gl. (36), wie bei den meisten Wärmeleitungsgleichungen mit temperaturabhängigen Stoffwerten, ist eine analytische Lösung in geschlossener Form nicht möglich (BAEHR & STEPHAN 1998). In diesem Fall wird eine numerische Lösung angestrebt.

4.3.5 Anfangs- und Randbedingungen

Im vorangehenden Unterabschnitt wurde die Wärmeleitungsgleichung für das Elektronenstrahlschmelzen formuliert. Die gefundene Gleichung (36) bestimmt jedoch die Temperaturen nur innerhalb der Bilanzhülle. Zur vollständigen Evaluierung des Temperaturfelds ist es zusätzlich notwendig, Grenzbedingungen zu definieren, die die Lösung der Differentialgleichung beeinflussen. Unter dem Begriff *Grenzbedingungen* werden sowohl örtliche Randbedingungen als auch zeitliche Anfangsbedingungen subsumiert. Die Randbedingungen beziehen sich stets auf die thermischen Zustände an den Grenzflächen eines Körpers bzw. einer Bilanzhülle. Sie können in die folgenden drei Arten eingeordnet werden (BAEHR & STEPHAN 1998):

- 1. Art: Die zeitliche und örtliche Verteilung der Temperatur ist bekannt.
- 2. Art: Die Wärmestromdichte entlang der Oberflächennormalen ist als Funktion der Zeit und des Ortes vorgeschrieben.
- 3. Art: Es liegt eine Berührung mit einem anderen Medium vor.

Anhand der schematischen Darstellung der Bilanzhülle in Abbildung 36 kann bestimmt werden, welche Art der Randbedingung an den jeweiligen Grenzflächen gilt. Zunächst wird die Oberfläche G1 betrachtet. Wie in Unterabschnitt 4.3.3 ausgeführt, muss hier vor allem der eindringende Elektronenstrahl als Wärmequelle berücksichtigt werden. Seine Leistung wird, wie in Unterabschnitt 1.3.1 beschrieben, durch Kollisionen mit den Gitteratomen des Metallpulvers in den Werkstoff eingekoppelt. Allerdings treten dabei auch Verluste, beispielsweise durch Röntgenstrahlung oder Rückstreuелеktronen, auf. Diese können jedoch hinreichend genau approximiert werden und finden im folgenden Unterabschnitt durch die Einführung eines verfahrenstechnischen Wirkungsgrads η_v Berücksichtigung. Relevant für die Oberfläche sind vor allem die auftretenden energetischen Verluste durch Wärmestrahlung. Der Wärmestrom, der vom Strahler an die ihn umschließende Umgebung abgeführt wird, berechnet sich nach der folgenden Gleichung (BAEHR & STEPHAN 1998):

$$\dot{Q}_S = A_K \cdot \sigma \cdot (\varepsilon \cdot T_K^4 - a \cdot T_U^4) \quad (37)$$

In Gl. (37) bezeichnet σ die Stefan-Boltzmann-Konstante mit einem Wert in Höhe von $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$. Die Umgebungstemperatur wird in Gl. (37) durch den Ausdruck T_U berücksichtigt und der emittierende Körper besitzt die Fläche A_K , die Temperatur T_K sowie den Emissionskoeffizienten ε . Letzt genannter spiegelt eine Materialeigenschaft wider, die neben dem Werkstoff auch von seiner Oberflächenbeschaffenheit, wie beispielsweise der Rauheit oder der Temperatur des Strahlers, abhängt. Für viele praktische Anwendungen wird diesbezüglich ein sog. *grauer Strahler* eingeführt. Das bedeutet, dass sein Absorptionsgrad α gleich seinem Emissionskoeffizient ε ist (BAEHR & STEPHAN 1998). Von SIH & BARLOW (1995) wurde eine Näherungsformel für ε_{eff} von Pulverschüttungen ermittelt (vgl. Unterabschnitt 4.3.7). Damit vereinfacht sich Gl. (37) zu

$$\dot{Q}_S = A_K \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{\text{eff}} \cdot (T_K^4 - T_U^4) \quad (38)$$

In obiger Gleichung fällt auf, dass die dem Prozess aufgrund von Strahlung verloren gehende Leistung mit der vierten Potenz der Temperatur des Strahlers ansteigt. Wegen der hohen Prozesstemperaturen im Bereich des Schmelzpunkts von Eisen (1535 °C; SEIDEL 1999) ist es wichtig, diesen Wärmestrom zu berücksichtigen und als Randbedingung 2. Art (s. o.) in die Modellierung einzubeziehen.

Ein weiterer Energiefluss über die Systemgrenzen hinweg ist durch den Wärmeübergang in die umgebende pulverförmige, feste und flüssige Phase durch Wärmeleitung gegeben (vgl. Abbildung 36). Dieser Wärmestrom tritt an den Grenzflächen G2 bis G6 auf, da die betrachtete Bilanzhülle aus dem umliegenden Material als freigeschnitten zu betrachten ist. Die korrekte Modellvorstellung hierfür ist demnach die Randbedingung 3. Art (s. o.), da ein unmittelbarer Kontakt besteht. Damit geht einher, dass die Wärmestromdichte, die durch die Bilanzhülle in die Umgebung abfließt, für die Prozesszone⁷ und für den benachbarten Werkstoff⁸ identisch ist. Daher gilt an den Grenzflächen⁹:

$$\lambda^{(i)} \cdot \left(\frac{\partial T^{(i)}}{\partial n} \right)_G = \lambda^{(a)} \cdot \left(\frac{\partial T^{(a)}}{\partial n} \right)_G \quad \text{bzw.} \quad (39)$$

$$T_G^{(i)} = T_G^{(a)} \quad (40)$$

Damit wird ausgedrückt, dass die Temperaturen der beiden Gebiete in den Grenzflächen zwar identisch sind, sich in Abhängigkeit der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit des Bereichs jedoch unterschiedliche Temperaturgradienten einstellen. Dies ist beispielsweise für den Übergang zwischen Pulver und Feststoff mit deutlich differierenden Werten für

⁷ Index i: innen

⁸ Index a: außen

⁹ Index G: Grenzfläche

λ der Fall, d. h. im Bereich der kleineren Wärmeleitfähigkeit resultiert ein größerer Temperaturgradient.

Abschließend bedarf es der Festlegung einer Anfangsbedingung. Damit wird jedem Ort innerhalb der Bilanzhülle eine Starttemperatur zu einem definierten Zeitpunkt zugewiesen. Da in den meisten Fällen die Zeitzählung mit diesem Zustand beginnt, gilt die folgende Konvention (vgl. Gl. (41)):

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z) \quad (41)$$

Im vorliegenden Fall wird die zu wählende Temperaturverteilung $T_0(x, y, z)$ sowohl von der Vorheiztemperatur des Pulvers als auch von der aktuellen Temperatur des bereits verfestigten Bereichs beeinflusst.

4.3.6 Wärmequelle Elektronenstrahl

Aufgrund der Eindringtiefe des Elektronenstrahls im zweistelligen Mikrometerbereich ist es zur Klärung der thermischen Abläufe notwendig, die Verteilung der eingebrachten Leistung in allen drei Raumrichtungen abzubilden. Dazu wird eine mathematische Formulierung gewählt, die neben dem Betrag der übertragenen Leistung und der Intensitätsverteilung über dem Strahlquerschnitt auch das Absorptionsverhalten des Werkstoffs wiedergibt. Auf diese Weise wird jedem Raumpunkt im Strahleindringbereich eine entsprechende Leistungsdichte zugeordnet. Als Vereinfachung wird darauf verzichtet, den Einfluss unterschiedlicher Einfallswinkel zu berücksichtigen.

Horizontale Intensitätsverteilung

Entsprechend Unterabschnitt 1.3.1 ist die horizontale Intensitätsverteilung der vom Elektronenstrahl mitgeführten Leistung über dessen Querschnitt nicht konstant. Zusätzlich unterliegt dieser Verlauf in der Realität Abweichungen durch variierende Emissionsstromdichten, Veränderungen der Kathodenfläche sowie Abbildungsfehler der Kanone (SCHILLER et al. 1977). Daher wurde zur besseren Vergleichbarkeit von Einstelldaten verschiedener Elektronenstrahlanlagen darauf übergegangen, einen sog. äquivalenten Strahldurchmesser d_0 zu definieren (SCHULTZ 2000). Beispielsweise bezeichnet d_{90} jenen Durchmesser einer Kreisfläche senkrecht zur Strahlachse, innerhalb derer ein Anteil von $u = 90\%$ der Leistung auf die Werkstückoberfläche auftrifft (DIN 32511 2005). Die horizontale Intensitätsverteilung I_h über dem Strahlquerschnitt (xy -Ebene) entspricht nach Gl. (42) in guter Näherung einer normalverteilten, zweidimensionalen Dichtefunktion (BÖHM 1999), deren Ursprung mit der Strahlachse übereinstimmt:

$$I_h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_B^2} e^{\frac{-1}{2\sigma_B^2}(x^2 + y^2)} \quad (42)$$

Für die verwendete Versuchsanlage wurde von SIGL (2008) der Strahlfleckdurchmesser bei einem Linsenstrom von $I_L = 1830$ mA und einer Beschleunigungsspannung von $U_A = 100$ kV zu $d_B = 0,2$ mm bestimmt. Dabei stellte er zudem fest, dass der gemessene Wert in einem für das Elektronenstrahlschmelzen typischen Strahlstrombereich von $0 \text{ mA} \leq I_B \leq 20$ mA annähernd konstant ist. Mit diesem Referenzwert kann die horizontale Intensitätsverteilung $I_h(x,y)$ durch Bestimmung der Standardabweichung σ_B den realen Bedingungen angepasst werden. Dazu muss σ_B durch Integration von Gl. (42) über die kreisrunde Strahlaufftrefffläche A_B (vgl. Gl. (43)) mit dem Durchmesser d_B ermittelt werden:

$$A_B = \left(\frac{d_B}{2} \right)^2 \cdot \pi \quad (43)$$

Dies führt zur Verteilungsfunktion des enthaltenen Strahlleistungsanteils u (vgl. Gl. (44) bzw. Gl. (45)).

$$u = \frac{P_{90}}{P_B} \text{ bzw.} \quad (44)$$

$$u = \iint_{A_B} I(x,y) dA = \iint_{A_B} \frac{1}{2\pi\sigma_B^2} \cdot e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_B^2}} dx dy \quad (45)$$

Für eine geschlossene Lösung von Gl. (45) ist es notwendig, eine Transformation in Zylinderkoordinaten, d. h. $x = r \cdot \cos\varphi$ und $y = r \cdot \sin\varphi$, durchzuführen (BRONSTEIN et al. 2000). Unter Berücksichtigung der Jacobi-Determinante mit dem Wert r ergibt sich damit bei der Integration folgender Zusammenhang (s. Gl. (46)):

$$\begin{aligned} u &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_B}{2}} \frac{1}{2\pi\sigma_B^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_B^2}} r dr d\varphi = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[e^{-\frac{r^2}{2\sigma_B^2}} \right]_0^{\frac{d_B}{2}} d\varphi = \\ &= \frac{1}{2\pi} \left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_B}{2}\right)^2}{2\sigma_B^2}} \right) \int_0^{2\pi} d\varphi = 1 - \exp\left(-\frac{\left(\frac{d_B}{2}\right)^2}{2\sigma_B^2}\right) \end{aligned} \quad (46)$$

Mit $u = 0,9$ sowie $d_B = 0,2$ mm (s. o.) kann in der Folge mit Gl. (47) die Standardabweichung für den Elektronenstrahl σ_B bestimmt werden.

$$\sigma_B = \frac{d_B}{2} \cdot \sqrt{\frac{-1}{2 \cdot \ln(1-u)}} = \frac{d_B}{2} \cdot \sqrt{\frac{-1}{2 \cdot \ln(0,1)}} = 4,66 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad (47)$$

Wird das Ergebnis aus Gl. (47) in Gl. (42) substituiert, so resultiert daraus die horizontale Intensitätsverteilung $I_h(x,y)$ des Strahls in der xy -Ebene. In Abbildung 37 ist $I_h(x,y)$ für $\sigma_B = 4,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt.

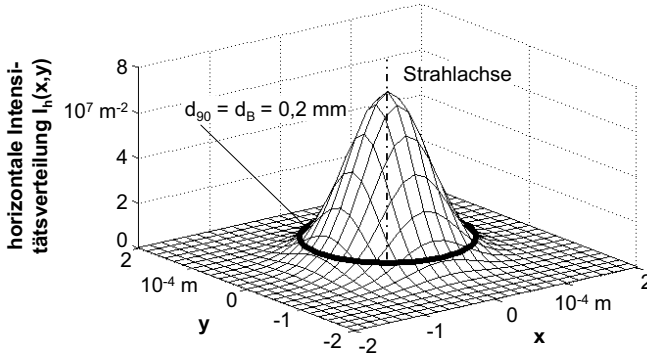


Abbildung 37: Horizontale Intensitätsverteilung der Leistung des Elektronenstrahls $I_h(x,y)$ für $\sigma_B = 4,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

Die Koordinatenachsen x und y spiegeln den Bezug zu den realen Abständen zur Strahlachse wider. Zusätzlich ist in Abbildung 37 die Begrenzung des Strahlaufreffbereichs A_B mit dem Durchmesser $d_{90} = d_B = 0,2 \text{ mm}$ wiedergegeben. Die Bestimmung der horizontalen Verteilung der Strahlintensität ist der erste Bestandteil der Wärmequellendefinition des Elektronenstrahls für den thermischen Prozess. Um eine dreidimensionale mathematische Abbildung dieser Wärmequelle zu erhalten, muss im Folgenden überdies die vertikale Verteilung der absorbierten Leistung bestimmt und zusammenfassend berücksichtigt werden.

Vertikale Intensitätsverteilung der absorbierten Leistung

Die Eindringtiefe S ist von der kinetischen Energie der Elektronen, also von der Beschleunigungsspannung, und von der Dichte des Werkstoffs ρ abhängig (SCHILLER et al. 1977). Für praktische Anwendungen ist S als diejenige Wegstrecke im Werkstoff definiert, nach deren Durchlaufen die Energie der Strahlelektronen im Mittel auf 1 % der Anfangsenergie abgefallen ist (ARDENNE 1962). Bewegt sich die Beschleunigungsspannung U_A im Bereich zwischen 10 kV und 100 kV, so gilt nach CHRISTENHUSZ & REINER (1967) für die Eindringtiefe S bei Fertigungsprozessen auf Basis eines Elektronenstrahls näherungsweise Gl. (48):

$$S \approx 2,1 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{U_A^2}{\rho} \quad (48)$$

Demnach ergibt sich für Stahl mit der Dichte $\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$ und eine Beschleunigungsspannung von $U_A = 100 \text{ kV}$ eine Eindringtiefe von $S = 0,027 \text{ mm}$. Analog dazu beträgt die Eindringtiefe für das verwendete Stahlpulver (Dichte $\rho = 3,4 \text{ g/cm}^3$) $S = 0,062 \text{ mm}$. Zwar ist in der Literatur nicht explizit festgehalten, dass Gl. (48) auch für Schüttgüter gilt, jedoch zeichnet sich der verwendete Pulverwerkstoff durch eine geringe Schüttdichte von ca. 44 % aus und besteht daher nur zum kleineren Anteil aus Feststoff. Den Hauptteil des Werkstoffvolumens nimmt das Vakuum ein, das keine Abschwächung des Elektronenstrahls hervorruft. Dadurch erklärt sich eine größere Eindringtiefe, da die einfallenden Elektronen deutlich weniger Kollisionen mit den Gitteratomen eines vergleichbaren Feststoffs erfahren. Die vorgenommene Approximation ist daher als hinreichend genau anzusehen.

Die Energie des Elektronenstrahls wird mit zunehmendem Eindringen in z-Richtung senkrecht zur beaufschlagten Werkstückoberfläche nicht gleichverteilt an das Material abgegeben (BIRKHOFF 1958). Vielmehr verhält sich die spezifische, je Volumeneinheit absorbierte Leistung $p_A(z)$ entsprechend eines Polynoms zweiten Grades (vgl. Gl. (49); KLEIN 1962):

$$\frac{p_A(z)}{P_{A\max}} = 1 - \frac{9}{4} \cdot \left(\frac{z}{S} - \frac{1}{3} \right)^2 \quad (49)$$

Darin bezeichnet $P_{A\max}$ den Maximalwert der absorbierten Leistung je Volumeneinheit. Die von Gl. (49) beschriebene Kurve erreicht bei einem Drittel der Eindringtiefe ein Maximum und fällt danach bis zur vollen Eindringtiefe S streng monoton auf Null ab. Unter Einführung des Quotienten

$$v = \frac{p_A(z)}{P_{A\max}} \quad (50)$$

ergibt sich mit der Konvention, dass S im negativen Bereich auf der z-Achse aufgetragen wird, folgender Zusammenhang:

$$v(z) = -\frac{9}{4} \left(\frac{z}{S} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{z}{S} \right) + \frac{3}{4} \quad (51)$$

Da bis zur vollständigen Eindringtiefe S die gesamte Leistung $P_{A\max}$ absorbiert wird, muss nach Gl. (52) gelten:

$$S_v \cdot \int_{z=-S}^0 v(z) dz = 1 \quad (52)$$

Um diese Bedingung zu erfüllen, bedarf es einer Skalierung um den Faktor $S_v = 1/0,75$. Damit kann die vertikale Intensitätsverteilung $I_v(z)$ wie folgt formuliert werden:

$$I_v(z) = S_v \cdot v(z) = \frac{1}{0,75} \left(-\frac{9}{4} \left(\frac{z}{S} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{z}{S} \right) + \frac{3}{4} \right) = -3 \left(\frac{z}{S} \right)^2 - 2 \frac{z}{S} + 1 \quad (53)$$

Definition der Wärmequelle

In der Wärmeleitungsgleichung (36) kann der Elektronenstrahl als Wärmequelle berücksichtigt werden. Um eine dreidimensionale Verteilung seiner eingebrachten Energie zu erhalten, bedarf es zunächst der Überlagerung von horizontaler und vertikaler Intensitätsverteilung. Daher werden zur Superposition die beiden Gleichungen (42) und (53) miteinander multipliziert:

$$I(x, y, z) = I_h(x, y) \cdot I_v(z) = \frac{1}{2\pi\sigma_B^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_B^2}} \cdot \left(-3 \left(\frac{z}{S} \right)^2 - 2 \frac{z}{S} + 1 \right) \quad (54)$$

Unter Berücksichtigung der o. g. Wirkungsgrade sowie des Skalierungsfaktors K_W ist es möglich, die dreidimensionale Verteilung der absorbierten Strahlleistung zu bestimmen (vgl. Gl. (55)):

$$\dot{W}(x, y, z) = K_W \cdot \eta_F \cdot \eta_v \cdot P_B \cdot I(x, y, z) \quad (55)$$

Mit Gl. (54) ergibt sich daraus der in Gl. (56) aufgeführte Zusammenhang:

$$\dot{W}(x, y, z) = K_W \cdot \eta_F \cdot \eta_v \cdot P_B \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_B^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_B^2}} \cdot \left(-3 \left(\frac{z}{S} \right)^2 - 2 \frac{z}{S} + 1 \right) \quad (56)$$

Die Größe P_B bezeichnet die Leistung am Ausgang der Strahlquelle. Durch den Wirkungsgrad $\eta_F = 0,99$ werden die Leistungsverluste in Höhe von 1 % (DVS 3209 1995) bei der Strahlführung und -formung berücksichtigt. Der hauptsächlich durch die Elektronenrückstreuung, die Röntgenstrahlung sowie die entstehenden Dampfmoleküle beeinflusste verfahrenstechnische Wirkungsgrad η_v beträgt 78,8 % (vgl. Unterabschnitt 1.3.1). Die Konstante K_W in Gl. (56) kann mit Hilfe der in Gl. (57) gegebenen Bedingung bestimmt werden:

$$\iiint_{V_E} \dot{W}(x, y, z) dx dy dz = u \cdot \eta_F \cdot \eta_v \cdot P_B = 0,9 \cdot \eta_F \cdot \eta_v \cdot P_B \quad (57)$$

Damit wird ausgedrückt, dass innerhalb des aus Strahlfleckdurchmesser und Eindringtiefe gegebenen zylinderförmigen Volumens

$$V_E = A_B \cdot S = \left(\frac{d_B}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot S \quad (58)$$

$u = 90\%$ der absorbierten Strahlleistung (s. o.) enthalten sein müssen. Dies ist der Fall für $K_W = 1/S$. Wird dieser Wert sowie σ_B aus Gl. (47) in Gl. (56) substituiert, ergibt sich abschließend die folgende Gleichung (59) der Wärmequelle des Elektronenstrahls:

$$\dot{W}(x, y, z) = -\eta_F \cdot \eta_v \cdot P_B \cdot \frac{4 \ln(1-u)}{\pi d_B^2 S} e^{\frac{4 \ln(1-u)}{d_B^2} (x^2 + y^2)} \cdot \left(-3 \left(\frac{z}{S} \right)^2 - 2 \frac{z}{S} + 1 \right) \quad (59)$$

Zur vollständigen Beschreibung des Temperaturfeldes muss dieser Ausdruck in Gl. (36) eingesetzt werden. Die Lösung der resultierenden Formel folgt in Kapitel 5.

4.3.7 Effektive Werkstoffkennwerte

Allgemeines

Obwohl Metallpulver aus einzelnen Partikeln mit unterschiedlichen Abmessungen besteht, wurde es für die bisherigen Untersuchungen als Werkstoffkontinuum betrachtet. Diese Vorgehensweise ist aus mehreren Gründen als günstig zu bewerten. Zum einen ist eine rechnergestützte Bestimmung der thermischen Vorgänge unter Berücksichtigung einer Vielzahl diskreter Partikel definierter geometrischer Abmessungen sowie ihrer exakten Lage nur mit einer deutlichen Rechenzeiterhöhung möglich. Zum anderen zeigten Vorarbeiten aus den Bereichen der generativen Verfahren, der Verfahrenstechnik und des Anlagenbaus, dass die Betrachtung als Werkstoffkontinuum hinreichend genaue Aussagen über die thermischen Abläufe liefert (vgl. u. a. SCHLÜNDER & TSOTSAS 1988; TSOTSAS & MARTIN 1987).

Die zur Berechnung des instationären Temperaturfeldes benötigten thermischen Kennwerte des Pulverwerkstoffs sind die spezifische Wärmekapazität c , die Wärmeleitfähigkeit λ , die Dichte ρ sowie der Emissionskoeffizient ε . Bei kompakten Feststoffen sind die genannten Größen i. d. R. von der Temperatur abhängig. Bei Pulverwerkstoffen kommt hinzu, dass sich die Werte auch mit der relativen Dichte bzw. der Partikelform ändern. Die entsprechenden Zusammenhänge bedürfen einer Modellierung der sog. *effektiven Kennwerte* des Pulverwerkstoffs. Falls Messdaten von Pulvercharakteristika bzw. von dafür benötigten Eingangsgrößen für die Berechnung verfügbar sind, werden diese zum Abgleich herangezogen. Jedoch dient die Modellierung der relevanten Pulverkennwerte auch dazu, ein Verständnis für die thermischen Vorgänge im betrachteten Werkstoff zu schaffen und, nicht zuletzt, die Wärmeleitungsgleichung für das Elektronenstrahlschmelzen (vgl. Gl. (36) auf Seite 84) zu vervollständigen.

Spezifische Wärmekapazität

Nach HERWIG (2000) ist die spezifische Wärmekapazität c_p ein Maß für die Fähigkeit eines Festkörpers, thermische Energie zu speichern. Da die im Allgemeinen notwendige

Unterscheidung zwischen c_v^{10} und c_p^{11} speziell bei inkompressiblen Stoffen, wie beispielsweise Metallen oder Metallpulvern, nicht getroffen werden muss (BAEHR & STEPHAN 1998), gilt für die weiteren Untersuchungen:

$$c_p = c_v = c \quad (60)$$

Für den verwendeten Pulverwerkstoff 1.4404 sind vom Hersteller keine Messwerte für c verfügbar. Auch gibt es in der frei zugänglichen Literatur keine experimentell ermittelten Angaben über vergleichbare Werkstoffsysteme. Es wurde daher ein analytischer Ansatz zur Bestimmung des Verlaufs der spezifischen Wärmekapazität c in Abhängigkeit der Temperatur gewählt. Von WAGNER (2003) wurde eine Näherungslösung für gasdurchsetztes Metallpulver vorgeschlagen. Darin wird die effektive spezifische Wärmekapazität eines Volumenelements des Pulvers mit der Masse m_{ges} nach Gl. (61) als Mittelwert aus den massebezogenen Gas- und Feststoffanteilen errechnet:

$$c_{\text{Pulver}} = \frac{m_{\text{Gas}}}{m_{\text{ges}}} c_{\text{Gas}} + \frac{m_{\text{Feststoff}}}{m_{\text{ges}}} c_{\text{Feststoff}} \quad (61)$$

Obige Gl. (61) stimmt mit der massebezogenen Definition der spezifischen Wärmekapazität überein (BAEHR & STEPHAN 1998):

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (62)$$

Dementsprechend gibt c an, welche Wärmemenge Q einer bekannten Masse m eines Materials zugeführt werden muss, um eine Temperaturerhöhung um den Betrag ΔT zu erreichen. Daraus folgt, dass die spezifische Wärmekapazität des Pulvers den entsprechenden Wert des kompakten Feststoffs annimmt, da m_{Gas} im Vakuum des Elektronenstrahlschmelzens als nicht vorhanden betrachtet werden kann. Aus $m_{\text{Gas}} = 0$ sowie Gl. (61) ergibt sich damit Gl. (63):

$$c_{\text{Pulver}} = c_{\text{Feststoff}} \quad (63)$$

Für den Pulverwerkstoff 1.4404 kann $c_{\text{Pulver}} = c_{\text{Feststoff}}$ einschlägigen Quellen, wie z. B. dem VDI-WÄRMEATLAS (2002), bis zur Curie-Temperatur, oberhalb derer ein Material nur noch paramagnetische Eigenschaften aufweist, entnommen werden (vgl. Abbildung 38). Von GRIGORIEV & MEILIKHOV (1996) wird die spezifische Wärmekapazität der Schmelze mit $c = 0,75 \text{ kJ/(kgK)}$ angegeben. Im darunterliegenden Temperaturbereich zwischen Curie- und Schmelztemperatur zeigen die Ergebnisse von BANERJEE et al. (2007), dass für 1.4404 in guter Näherung linear interpoliert werden kann.

¹⁰ Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen (BAEHR & STEPHAN 1998)

¹¹ Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (BAEHR & STEPHAN 1998)

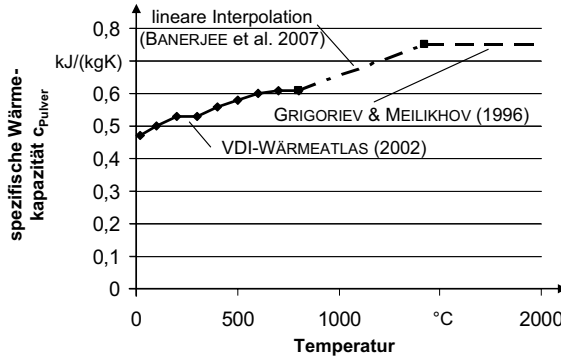


Abbildung 38: Verlauf der spezifischen Wärmekapazität des Pulverwerkstoffs 1.4404 über der Temperatur (GRIGORIEV & MEILIKHOV 1996; VDI-WÄRMEATLAS 2002; BANERJEE et al. 2007)

Im resultierenden Verlauf aus den beschriebenen drei Abschnitten sind die Änderungen der spezifischen Wärmekapazität in Bezug auf die Gefüge- und Phasenzustände enthalten. Dementgegen spiegelt der Verlauf in Abbildung 38 jedoch nicht die Schmelzenthalpie der Legierung wider. Es bedarf daher einer Erweiterung des Ausdrucks c_{Pulver} , um den Zu- und Abfluss der zusätzlichen Wärmemenge einbeziehen und in Gl. (36) substituieren zu können. Nach REDDY & GARTLING (2000) berechnet sich die effektive spezifische Wärmekapazität c_{eff} gemäß Gl. (64).

$$c_{\text{eff}}(T) = c_{\text{Pulver}}(T) + \delta(T - T_M, \Delta T) \cdot \Delta H \quad (64)$$

Die obige Gleichung ist nur für Legierungen gültig, d. h. wenn die Umwandlung von festem Material zur Schmelze in einem ausgedehnten Temperaturbereich zwischen Solidus- und Liquidustemperatur abläuft. Nach RAPATZ & KRAINER (1962) gilt für den verwendeten Werkstoff 1.4404:

$$\Delta T = T_{\text{Liquidus}} - T_{\text{Solidus}} = 1430^\circ\text{C} - 1385^\circ\text{C} = 45^\circ\text{C} \quad (65)$$

Der Ausdruck δ in Gl. (64) bezeichnet eine normalverteilte Funktion, gemäß derer die Schmelzenthalpie in Höhe von $\Delta H = 276 \text{ kJ/kg}$ (GRIGORIEV & MEILIKHOV 1996) zwischen T_{Solidus} und T_{Liquidus} vollständig zur spezifischen Wärmekapazität c_{Pulver} addiert wird. Diese Normalverteilung ist achsensymmetrisch und wie folgt definiert (vgl. Gl. (66); REDDY & GARTLING 2000):

$$\delta(T - T_M, \Delta T) = \frac{2}{\Delta T \sqrt{\pi}} e^{-\frac{(T - T_M)^2}{(\Delta T)^2}} \quad (66)$$

Das Maximum der in Gl. (66) beschriebenen Kurve befindet sich im Zentrum des Umwandlungsbereichs zwischen T_{Solidus} und T_{Liquidus} . Ihr Maximum liegt demnach bei T_M :

$$T_M = T_{\text{Solidus}} + (T_{\text{Liquidus}} - T_{\text{Solidus}}) / 2 = 1407,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (67)$$

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Pulverschüttungen unterscheidet sich wesentlich von den Werten des entsprechenden kompakten Feststoffs und bedarf daher einer genauen Betrachtung. Dies geschieht mit dem Ziel, möglichst genaue Werte in Abhängigkeit der Temperatur zu erhalten. Jedoch existiert keine analytische Lösung, welche den Verlauf über die gesamte Temperaturspanne bis hin zum Schmelzpunkt wiedergibt. Dennoch lässt sich der gesamte Temperaturbereich in voneinander abgegrenzte Abschnitte unterteilen. Von Raumtemperatur bis zum Soliduspunkt des Werkstoffs bleibt die Geometrie der Partikel bzw. die Schüttungsdichte des Pulvers annähernd konstant, insbesondere wenn das Material, wie beim Elektronenstrahlschmelzen, sehr schnell aufgeheizt wird und daher nahezu kein Festphasensintern auftritt (GERMAN 1996).

Über der Solidustemperatur tritt das Material in den teilflüssigen Bereich über, was zum zunehmenden Flüssigphasensintern der Partikel, d. h. zum Aufschmelzen, führt, wodurch die Pulverdichte signifikant ansteigt. Als Folge wird nicht nur die Partikelform sukzessive aufgelöst, auch die Größe der Kontaktstellen zwischen den Teilchen nimmt erheblich zu. Nach dem Überschreiten der Liquidustemperatur ist der Werkstoff vollständig aufgeschmolzen. Nach einer darauffolgenden Abkühlung und Verfestigung verhält sich das Material wie der entsprechende kompakte Feststoff. Zur Integration der beschriebenen Vorgänge wird daher ein kombiniertes Wärmeleitungsmodell in Anlehnung an WAGNER (2003) eingeführt (vgl. Abbildung 39).

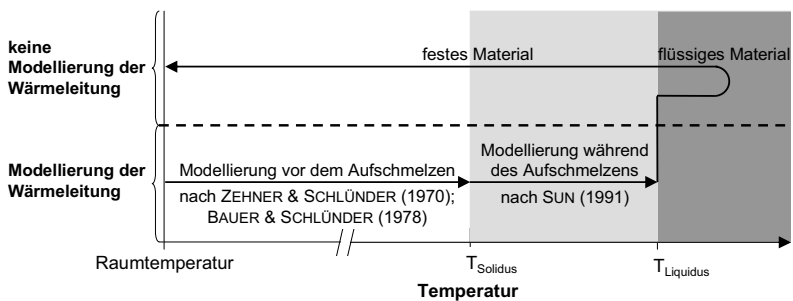


Abbildung 39: Kombiniertes Wärmeleitungsmodell für metallische Pulverwerkstoffe in Anlehnung an WAGNER (2003)

Wie in Abbildung 39 verdeutlicht, werden die Wärmeleitungsvorgänge in den o. g. Temperaturabschnitten bzw. die zugehörigen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit

des Pulverbetts während des Aufheizvorgangs modelliert. Dazu werden Modellierungsansätze von ZEHNER & SCHLÜNDER (1970), BAUER & SCHLÜNDER (1978) sowie SUN (1991) herangezogen und hinsichtlich der physikalischen Randbedingungen des Elektronenstrahlschmelzens adaptiert. Für die anschließende Abkühlung aus der Schmelze ist die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs bekannt und kann der Literatur entnommen werden. Daher wird von einer umfangreichen mathematischen Modellierung dieser Materialkonstante bei sinkender Temperatur abgesehen. Im Folgenden wird die Modellierung der Wärmeleitfähigkeit in den jeweiligen Temperaturbereichen beschrieben und das Ergebnis zur Vervollständigung von Gl. (36) verwendet.

Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit vor dem Aufschmelzen

Die effektive Wärmeleitfähigkeit von Pulverwerkstoffen vor dem Aufschmelzen hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ab, welche in primäre und sekundäre Einflussgrößen eingeteilt werden (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Primäre und sekundäre Einflussgrößen auf die effektive Wärmeleitfähigkeit von Pulverschüttungen nach VDI-WÄRMEATLAS (2002)

Bezeichnung	Größe	Einheit	primär	sekundär
Wärmeleitfähigkeit des Partikelfeststoffs	λ_p	W/(m ² K)	x	
Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gases	λ_g	W/(m ² K)	x	
Schüttungsporosität	ψ	-	x	
Druck	p	N/m ²		x
Temperatur	T	°C		x
Partikeldurchmesser	d_p	m		x
Partikelform	-	-		x
Mechanische und optische Eigenschaften der Partikel	-	-		x
Thermodynamische und optische Eigenschaften des Gases	-	-		x
Partikelabflachung	φ	-		x

Die ersten Arbeiten zur Abschätzung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Pulverwerkstoffen wurden bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts durchgeführt. Dementsprechend existieren dazu über 50 verschiedene Modellvorstellungen. TSOTSAS & MARTIN (1987) evaluierten unterschiedliche Ansätze und kamen zu dem Ergebnis, dass sich besonders das *Modell der Einheitszelle* nach ZEHNER & SCHLÜNDER (1970) bzw. BAUER & SCHLÜNDER (1978) für praktische Anwendungen eignet. Die Geometrie die-

ses Modells, das als repräsentativ für die gesamte Schüttung angenommen wird, besteht aus einem zylindrischen Kern mit zwei sich berührenden Partikelhälften sowie einer umgebenden Randzone (vgl. Abbildung 40). In dieser Randzone ist Gas enthalten, wobei für die vorliegende Arbeit von Luft ausgegangen wird und der im Vakuum herrschende Druck vom Modell berücksichtigt wird.

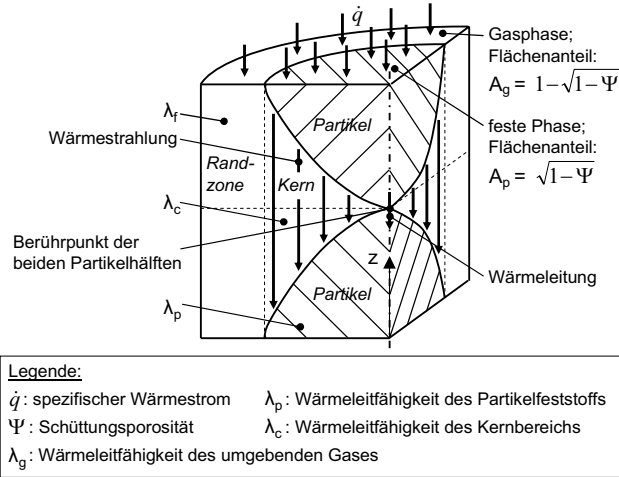


Abbildung 40: Geometriemodell der Einheitszelle zur Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit einer Pulverschüttung vor dem Aufschmelzen nach ZEHNER & SCHLÜNDER (1970); BAUER & SCHLÜNDER (1978)

Es wird angenommen, dass der spezifische Wärmestrom \dot{q} parallel zur Symmetrieachse sowohl über die feste Phase, d. h. den Partikelfeststoff, als auch über die Randzone in negativer z-Richtung geleitet wird (vgl. Abbildung 40). Jedes der dabei beteiligten Wärmetransportphänomene wird im Folgenden unter Einbeziehung der primären und sekundären Einflussgrößen (vgl. Tabelle 4) formuliert. Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} der Pulverschüttung errechnet sich mit den zur Wärmeleitung beitragenden Flächenanteilen A_g und A_p wie folgt (vgl. Abbildung 40; SCHÖNBUCHER 2002):

$$\lambda_{\text{eff}} = (A_g \cdot F_g + A_p \cdot F_p) \cdot \lambda_g = \{(1 - \sqrt{1 - \Psi}) \cdot F_g + \sqrt{1 - \Psi} \cdot F_p\} \cdot \lambda_g \quad (68)$$

für $T < T_{\text{Solidus}}$

In obiger Formel bezeichnet F_g den Berechnungsfaktor für die Gasphase, F_p den Berechnungsfaktor für die feste Phase, λ_g die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gases und ψ die Schüttungsporosität (SCHÖNBUCHER 2002). Wie bereits im Rahmen von Unterabschnitt 1.3.1 ausgeführt, läuft der Prozess des Elektronenstrahlschmelzens prinzipiell

bedingt bei einem Druck von maximal $1 \cdot 10^{-4}$ mbar (oben als Vakuum bezeichnet) ab. Dies bedeutet, dass Konvektion vernachlässigbar ist und damit eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit der Randzone einhergeht. Bei der Berechnung von λ_{eff} in Gl. (68) wird dies durch den Faktor F_g berücksichtigt (vgl. Gl. (69)):

$$F_g = \psi \cdot [(\psi - 1 + 1/k_g)^{-1} + k_{\text{rad}}] \quad (69)$$

Darin gibt k_g die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gases vom Umgebungsdruck nach Gl. (70) wieder und mit k_{rad} wird Gl. (69) um einen zusätzlichen Beitrag durch Wärmestrahlung zwischen den Partikeloberflächen erweitert (vgl. (71)).

$$k_g = \left[1 + \frac{l}{d_p} \right]^{-1} \quad (70)$$

Der Faktor k_g berechnet sich aus der mittleren freien Weglänge l der Gasmoleküle sowie dem Partikeldurchmesser d_p (vgl. Gl. (70)). Diese Weglänge bezeichnet dabei den mittleren Abstand zwischen zwei Stößen von Gasmolekülen und ist damit ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit von Gasen (vgl. u. a. STÖCKER 2007). Bei einem für das Elektronenstrahlschmelzen üblichen Druck von $p = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar beträgt dieser Wert $l = 0,11$ m (VDI-WÄRMEATLAS 2002). Wird dieser Wert in Gl. (70) eingesetzt, so berücksichtigt Gl. (68) damit die Absenkung von λ_g durch das vorherrschende Vakuum.

Innerhalb des Pulverbetts findet zusätzlich Wärmeübertragung in Form von Strahlung zwischen den Partikeloberflächen statt. Der entsprechende Anteil wird mit der dimensionslosen Größe k_{rad} ausgedrückt. Deren Betrag berechnet sich nach ZEHNER & SCHLÜNDER (1970) sowie BAUER & SCHLÜNDER (1978) mit der Temperatur T , dem Emissionskoeffizient der Partikeloberfläche ε und der Stefan-Boltzmann-Konstante σ gemäß:

$$k_{\text{rad}} = \frac{4 \cdot \sigma}{(2/\varepsilon) - 1} \cdot T^3 \cdot \frac{d_p}{\lambda_g} \quad (71)$$

Neben dem o. g. Berechnungsfaktor F_g muss auch F_p in Gl. (68) definiert werden. Dies geschieht gemäß Gl. (75) mit der Wärmeleitfähigkeit des Partikelfeststoffs λ_p , dem Abflachungskoeffizienten ϕ sowie der Wärmeleitfähigkeit des Kernbereichs λ_c (vgl. Abbildung 40; SCHÖNBUCHER 2002).

$$F_p = \phi \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_g} + (1 - \phi) \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_g} \quad (72)$$

Umso höher der Betrag von ϕ wird, desto größer ist die Abflachung der Kontaktstellen zwischen den Partikelhälften (vgl. Abbildung 40) und desto mehr Wärme kann durch

Leitung übertragen werden. Nach VDI-WÄRMEATLAS (2002) wird dieser empirisch ermittelte Koeffizient beim Partikelwerkstoff Stahl stets zu $\varphi = 0,0013$ gesetzt.

Die Wärmeleitfähigkeit des Kerns λ_c in Gl. (75) errechnet sich gemäß des folgenden, von ZEHNER & SCHLÜNDER (1970) ebenfalls empirisch ermittelten, Zusammenhangs:

$$\lambda_c = \frac{2 \cdot \lambda_g}{N_H} \cdot \left[\frac{B}{N_H^2} \cdot \frac{\lambda_p / \lambda_g - 1}{\lambda_p / \lambda_g} \cdot \ln \frac{\lambda_p / \lambda_g}{B} - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{N_H} \right] \quad (73)$$

$$\text{mit } N_H = 1 - \frac{B}{\lambda_p / \lambda_g} \quad (74)$$

Zwar berücksichtigen die beiden obigen Formeln die Form der Pulverpartikel durch den dimensionslosen Verformungsparameter B, der für das in der Arbeit untersuchte Pulversystem unter Annahme kugelförmiger Partikel nach VDI-WÄRMEATLAS (2002) zu $B = 1,63$ gesetzt wird. Jedoch geben die Gleichungen (73) und (74) nicht die reduzierte Wärmeleitfähigkeit λ_g durch den geringen Umgebungsdruck von $p = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar wieder. Zudem beschreiben die beiden o. g. Formeln nicht, dass auch im Kernbereich der in Abbildung 40 dargestellten Einheitszelle Wärme durch Strahlung übertragen wird. Dementsprechend müssen die Gleichungen (73) und (74) wie folgt angepasst werden (VDI-WÄRMEATLAS 2002):

$$\begin{aligned} \lambda_c = \frac{2 \cdot \lambda_g}{N_H} \cdot \left\{ \frac{B \cdot (\lambda_p / \lambda_g + k_{rad} - 1)}{N_H^2 \cdot k_g \cdot \lambda_p / \lambda_g} \cdot \ln \frac{\lambda_p / \lambda_g + k_{rad}}{B \cdot [k_g + (1 - k_g) \cdot (\lambda_p / \lambda_g + k_{rad})]} + \right. \\ \left. + \frac{B+1}{2 \cdot B} \cdot \left[\frac{k_{rad}}{k_g} - B \cdot \left(1 + \frac{1 - k_g}{k_g} \cdot k_{rad} \right) \right] - \frac{B-1}{N_H \cdot k_g} \right\} \quad (75) \end{aligned}$$

Dabei gilt für N_H :

$$N_H = \frac{1}{k_g} \cdot \left(1 + \frac{k_{rad} - B \cdot k_g}{\lambda_p / \lambda_g} \right) - B \cdot \left(\frac{1}{k_g} - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{k_{rad}}{\lambda_p / \lambda_g} \right) \quad (76)$$

Nach Einsetzen aller Größen kann der Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} bis zur Solidustemperatur bestimmt werden. Es zeigt sich, dass die resultierende Kurve, vergleichbar mit dem Verhalten des kompakten Feststoffs, annähernd linear mit der Temperatur ansteigt (vgl. Abbildung 41).

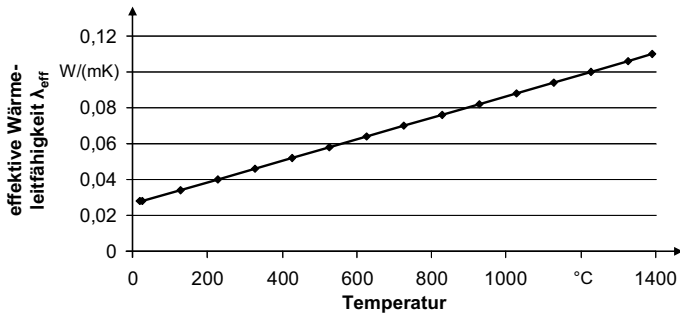


Abbildung 41: Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Pulversystems aus 1.4404 vor dem Aufschmelzen

In Bezug auf Abbildung 39 ist im Folgenden aufgeführt, wie die effektive Wärmeleitfähigkeit von Pulver im Temperaturbereich während des Aufschmelzens modelliert wird.

Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit während des Aufschmelzens

Im Bereich zwischen der Solidus- und der Liquidustemperatur finden im Pulverwerkstoff signifikante Umwandlungen statt. Änderungen der Pulvergestalt sowie die Umwandlung des Werkstoffzustands zur Schmelze machen es unmöglich, die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Modelle zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Schüttgütern im Temperaturbereich über dem Soliduspunkt zu nutzen. Für die laserstrahlbasierte generative Fertigung wurde daher von SUN (1991) ein Modell entwickelt, mit dem das Aufschmelzen berücksichtigt werden kann. Dieses dient als Ausgangspunkt für die hier beschriebene Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei der Verfestigung mittels Elektronenstrahl. Der Modellvorstellung liegt zugrunde, dass das Pulverbett aus identischen, kugelförmigen Partikeln vom Radius r besteht, wobei unterhalb der Solidustemperatur $r = r_a$ gilt. Die Partikel berühren sich zu Beginn des Schmelzvorgangs zunächst nur punktförmig (vgl. Abbildung 42 links).

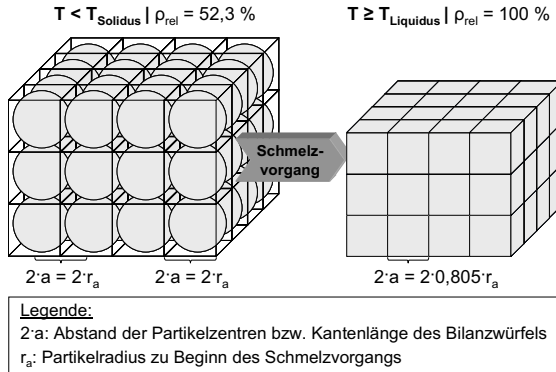


Abbildung 42: Modellvorstellung zum Übergang der Pulvergeometrie zu flüssigem Material nach SUN (1991)

Der Abstand zwischen den Partikelzentren beträgt zunächst $2 \cdot r_a$ und nimmt mit steigender Temperatur ab. Dabei umschreibt ein Bilanzvolumen in Form eines Würfels der Kantenlänge $2 \cdot a$ jedes Partikel mit dem Anfangsradius $r = r_a = a$. Die Größe a stellt in dem Modell von SUN (1991) die Laufvariable dar und verringert sich aufgrund der Dichtezunahme beim Erreichen der flüssigen Phase (Endzustand) bis auf $a = 0,805 \cdot r_a$ (vgl. Abbildung 43). Wie die u. s. Grafik ebenfalls zeigt, geht mit der Verkleinerung jedes Bilanzwürfels eine zunehmende Abflachung des beinhalteten kugelförmigen Partikels einher. Da die Masse innerhalb eines Bilanzwürfels während des Aufschmelzens erhalten bleibt, seine Kantenlänge a gleichzeitig jedoch zurückgeht (s. o.), folgt aus der Dichtesteigerung die Vergrößerung des aktuellen Partikelradius r (SUN 1991).

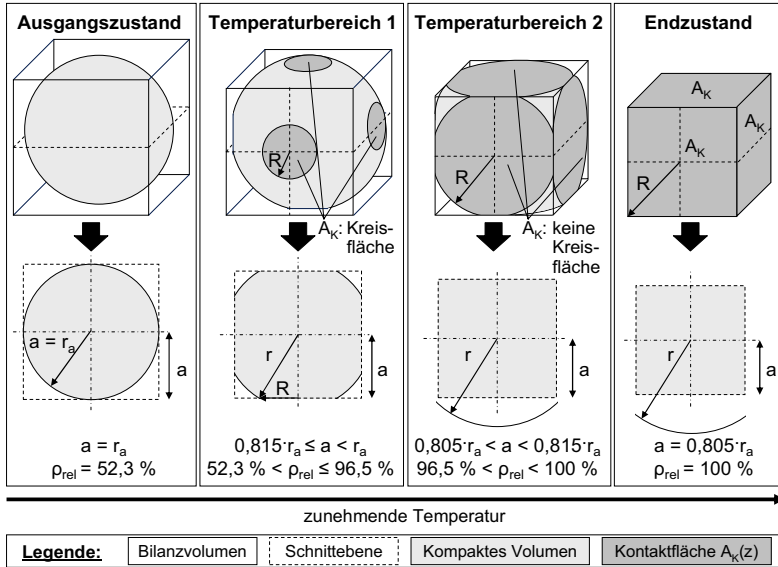


Abbildung 43: Geometrieänderung eines sinternden Pulverpartikels nach SUN (1991)

Die oben beschriebene Sinterhalsbildung führt zur Entstehung von kreisförmigen Kontaktflächen $A_K(z)$ mit dem Radius R (vgl. *Temperaturbereich 1* in Abbildung 43). Dies bleibt bis zu einer relativen Dichte von $\rho_{rel} = 96,5 \%$ bestehen. Unterschreitet die Kantenlänge des Bilanzwürfels den Wert $a = 0,815 \cdot r_a$, so ist die Kontaktfläche keine ideale Kreisfläche mehr, sondern weist vielmehr Abflachungen auf, da sich benachbarte Kontaktflächen überschneiden (vgl. *Temperaturbereich 2* in Abbildung 43). Dieser Sonderfall ist auch dadurch charakterisiert, dass die Poren in den Ecken des Würfels abgeschlossen sind. Bei einer weiteren Dichtesteigerung werden diese evakuierten Hohlräume kontinuierlich mit Material gefüllt. Die Umwandlung ist beendet, sobald der verflüssigte Werkstoff eine relative Dichte von $\rho_{rel} = 100 \%$ aufweist. In diesem Fall beträgt die Kantenlänge der Bilanzwürfel $a = 0,805 \cdot r_a$ (SUN 1991).

Die effektive Wärmeleitfähigkeit einer sinternden Pulverschüttung setzt sich nach SUN (1991) aus den Anteilen der Wärmeleitung im Partikelfeststoff λ_{eff_WL} sowie der Wärmestrahlung λ_{eff_WS} zusammen (vgl. Gl. (77)).

$$\lambda_{eff} = \lambda_{eff_WL} + \lambda_{eff_WS} \quad \text{für } T_{Solidus} \leq T < T_{Liquidus} \quad (77)$$

Der erste Term auf der rechten Seite von Gl. (77) lässt sich mit Hilfe des Wärmeleitwiderstands R_{WL} innerhalb des repräsentativen Bilanzwürfels um ein Pulverpartikel (s. o.) bestimmen. Dazu wird eine infinitesimal dünne Scheibe des Würfels mit der Dicke dz

betrachtet. Die Laufvariable z steht senkrecht auf der oben definierten Kontaktfläche A_K , durch die der Wärmestrom \dot{Q} fließt (vgl. Abbildung 44).

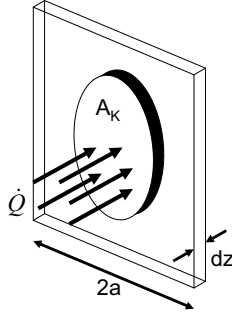


Abbildung 44: Wärmeleitung in der Kontaktfläche zweier benachbarter Partikel A_K

Durch Integration über z wird die Abhängigkeit der Fläche $A_K(z)$ von der Position der Schnittebene in die Berechnung einbezogen und es gelten unter Berücksichtigung von Symmetrieeigenschaften die Gleichungen (78) bis (81).

$$R_{WL} = 2 \cdot \int_0^x \frac{1}{\lambda_p \cdot A_K(z)} \cdot dz \quad \text{mit} \quad (78)$$

$$A_K(z) = \pi \cdot R^2 \quad \text{für } 0 \leq z \leq a - \sqrt{r^2 - a^2} \quad \text{bzw.} \quad (79)$$

$$A_K(z) = 4a\sqrt{R^2 - a^2} + 2R^2 \cdot \left[\frac{\pi}{2} - 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{a}{r}\right) \right] \quad \text{für } z > a - \sqrt{r^2 - a^2} \quad \text{und} \quad (80)$$

$$R = \sqrt{r^2 - (a - z)^2} \quad (81)$$

In Analogie zur Leitung von elektrischem Strom bildet sich bei der Wärmeleitung ein Fluss durch eine Platte mit dem Querschnitt A und der Dicke D nur dann aus, wenn eine Temperaturdifferenz ΔT anliegt (vgl. Gl. (82)).

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{D} \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{WL}} \quad (82)$$

Daraus folgt für den Anteil $\lambda_{\text{eff_WL}}$ der effektiven Wärmeleitfähigkeit Gl. (83).

$$\lambda_{\text{eff_WL}} = \frac{1}{R_{WL}} \cdot \frac{2a}{4a^2} = \frac{1}{4a} \left[\int_0^a \frac{dz}{\lambda_p \cdot A_K(z)} \right]^{-1} \quad \text{für } T_{\text{Solidus}} \leq T < T_{\text{Liquidus}} \quad (83)$$

In obiger Gl. (83) gilt es zu berücksichtigen, dass die Wärmeleitfähigkeit des kompakten Partikelmaterials λ_p temperaturabhängig ist. Mit Hilfe der im weiteren Verlauf hergeleiteten, temperaturabhängigen Funktion der Dichte des Werkstoffs ist es durch Umformung möglich, die halbe Kantenlänge des Bilanzwürfels a in Abhängigkeit der Temperatur zu bestimmen. Damit ist eine Zuordnung zwischen $\lambda_p(T)$ und a gegeben.

Der zweite Term der rechten Seite in Gl. (77) leistet ebenfalls einen Beitrag zur effektiven Wärmeleitfähigkeit des sinternden Pulvers. Durch Strahlung wird Wärme zwischen den Partikeloberflächen ausgetauscht. Dieser Mechanismus begünstigt die Wärmeleitfähigkeit des Pulvers. Daher ersetzt Gl. (84) den Ausdruck $\lambda_{\text{eff_ws}}$ in Gl. (77).

$$\lambda_{\text{eff_ws}} = \frac{8 \cdot \sigma \cdot T^3}{r_a} (3 \cdot r \cdot a - 2 \cdot r^2) \quad \text{für } T_{\text{Solidus}} \leq T < T_{\text{Liquidus}} \quad (84)$$

Mit dem Ausdruck $3ra - 2r^2$ wird die aktuelle Partikelgröße berücksichtigt. Je kleiner die Pulverpartikel im Verlauf des Sintervorgangs werden, desto geringer wird der Anteil der Wärmestrahlung (SUN 1991). Zusammenfassend lässt sich die effektive Wärmeleitfähigkeit des Pulvers durch Einsetzen in Gl. (77) wie folgt bestimmen:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{1}{4 \cdot a} \left[\int_0^a \frac{dz}{\lambda_p \cdot A_K(z)} \right]^{-1} + \frac{8 \cdot \sigma \cdot T^3}{r_a} (3 \cdot r \cdot a - 2 \cdot r^2) \quad (85)$$

für $T_{\text{Solidus}} \leq T < T_{\text{Liquidus}}$

Mit Gl. (85) steht die effektive Wärmeleitfähigkeit des Pulvers λ_{eff} im Bereich zwischen Solidus- und Liquidustemperatur für die spezifischen Bedingungen des Elektronenstrahlschmelzens zur Verfügung. Der resultierende Verlauf wird im Folgenden zur Definition der kombinierten Wärmeleitfähigkeit des Pulvers nach Abbildung 39 verwendet.

Wärmeleitung von kompaktem Werkstoff

Die Wärmeleitfähigkeit des kompakten Feststoffs bzw. des flüssigen Materials bedarf keiner umfangreichen Modellierung. Für den Temperaturbereich bis 1000 °C können die entsprechenden Werte von 1.4404 aus der Literatur entnommen werden (vgl. beispielsweise VDI-WÄRMEATLAS 2002). Nach SAHM et al. (2001) verhält sich flüssiges Metall diesbezüglich vergleichbar zum verfestigten Feststoff, da die Ordnung eines Metalls beim Aufschmelzen nahezu vollständig erhalten bleibt. Dies hat zur Folge, dass die Mechanismen der Wärmeleitung in Schmelzen ähnlich denen von kompakten Feststoffen sind. Ausgehend von der Annahme einer ruhenden Schmelze, d. h. der Abwesenheit von Wärmeübertragung durch Strömungseffekte in der flüssigen Phase, erfolgt eine lineare Extrapolation der o. g. Literaturangaben über die Liquidustemperatur hinaus.

Kombinierte effektive Wärmeleitung des Pulverwerkstoffs

Zusammenfassend gibt Abbildung 45 die effektive Wärmeleitfähigkeit des Pulverwerkstoffs 1.4404 nach dem kombinierten Wärmeleitungsmodell (s. o.) wieder.

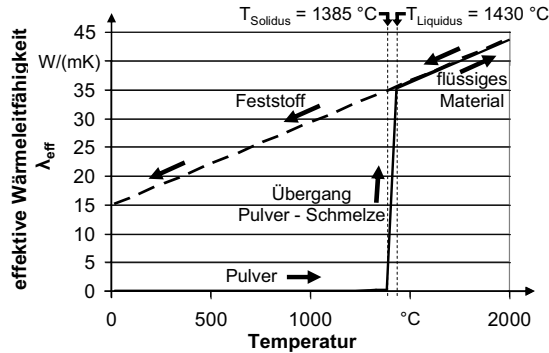


Abbildung 45: Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Pulverwerkstoff 1.4404 nach dem kombinierten Wärmeleitungsmodell

Es ist vor allem zu erkennen, dass die Beträge von λ_{eff} unterhalb der Solidustemperatur über zwei Größenordnungen kleiner als die Werte des kompakten Feststoffs bzw. des flüssigen Materials sind. Nach der in VDI-WÄRMEATLAS (2002) aufgeführten Klassifizierung zur Wärmeleitfähigkeit und den Erkenntnissen von SIGL (2008) besitzt das Metallpulver damit praktisch isolierende Eigenschaften. Mit dem Sintervorgang geht im Werkstoff auch ein signifikanter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bis zur Liquidustemperatur einher. Darüber liegt der Werkstoff im flüssigen Zustand vor. Beim Abkühlen erhält der Werkstoff seine feste Gestalt und es ist eine lineare Temperaturabhängigkeit von λ_{eff} gegeben.

Damit ist die Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von metallischen Pulverwerkstoffen für das Elektronenstrahlschmelzen nach dem kombinierten Wärmeleitungsmodell am Beispiel der Legierung 1.4404 abgeschlossen. Es folgt die Betrachtung der relativen Werkstoffdichte, die nach Gl. (48) insbesondere Einfluss auf die Eindringtiefe S der Strahlelektronen in den Werkstoff besitzt und damit die Intensitätsverteilung der Wärmequelle in der Pulverschicht wesentlich beeinflusst.

Relative Werkstoffdichte

Die Änderung der relativen Werkstoffdichte in Abhängigkeit der Temperatur ist stark mit dem Verhalten der effektiven Wärmeleitfähigkeit gekoppelt (SUN 1991). Wie insbesondere Abbildung 42 verdeutlicht, geht mit einer Temperaturerhöhung über den Soliduspunkt hinaus die stetige Zunahme der relativen Werkstoffdichte einher. Die zugrun-

de liegende Modellvorstellung wurde bereits ausführlich im Vorangehenden diskutiert. Da der Sinterprozess hauptsächlich zwischen der Solidus- und der Liquidustemperatur des Werkstoffs stattfindet, erhöht sich in diesem Bereich die relative Dichte stetig auf $\rho_{\text{rel}} = 100\%$ (vgl. Abbildung 46).

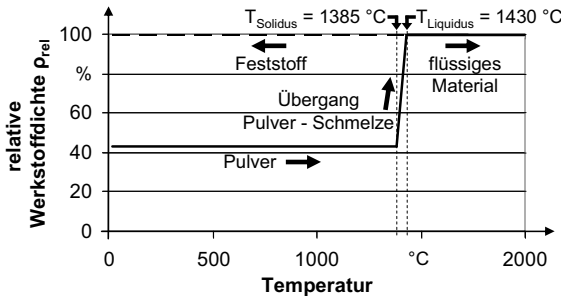


Abbildung 46: Verlauf der relativen Dichte des Pulverwerkstoffs 1.4404

Die Schüttungsdichte bzw. die relative Dichte ist definiert als das Verhältnis aus ρ_{Pulver} und ρ_{kompakt} (vgl. Gl. (19)). Nach GERMAN (1996) zeichnen sich Sinterprozesse besonders durch einen stetigen Verlauf aus, d. h. im Allgemeinen liegen keine sprunghaften Veränderungen oder Schwankungen der Werkstoffkennwerte vor. Daher wird der Verlauf der relativen Dichte durch eine lineare Interpolation zwischen Solidus- und Liquidustemperatur angenähert (vgl. Abbildung 46).

Die relative Werkstoffdichte verhält sich ähnlich wie die Kennwerte *Emissionsgrad* und *Wärmeleitfähigkeit*. Das bedeutet, dass sich der Werteverlauf beim Aufheizen des Materials bis in den flüssigen Bereich von demjenigen während des Abkühlens unterscheidet. Dies liegt darin begründet, dass der Werkstoff bei Überschreiten der Liquidustemperatur seine pulverförmige Gestalt verliert und anschließend in der flüssigen Phase vorliegt. Beim Abkühlen ist seine Zustand unterhalb der Solidustemperatur kompakt und dementsprechend beträgt die relative Werkstoffdichte bei sinkender Temperatur konstant $\rho_{\text{rel}} = 100\%$ (vgl. Abbildung 46). Dieser Wert stellt eine sehr gute Näherung dar, da die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Stahl vernachlässigbar klein ist (VDI-WÄRMEATLAS 2002).

Emissionskoeffizient

Wie bereits im Unterabschnitt 4.3.3 erläutert, geht beim Elektronenstrahlschmelzen ein Teil der eingebrachten Energie in Form von Strahlung über die Pulver- bzw. Schmelzbadoberfläche an die Umgebung verloren. Zur Abschätzung dieses Wärmestroms wird gemäß Unterabschnitt 4.3.5 der Emissionskoeffizient des Pulvers benötigt. Analog zu

den im Vorangehenden betrachteten Kennwerten erfolgt die Bestimmung des effektiven Emissionskoeffizienten ε_{eff} auf der Basis eines analytischen Modells.

Im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit wurden bisher nur wenige Arbeiten zur Berechnung des Emissionskoeffizienten von Pulverwerkstoffen durchgeführt. Diesbezüglich häufig zitierte Arbeiten stammen von SIH & BARLOW (1995). Die Ursache für die wiederholte Nennung dieser beiden Autoren ist mitunter darin zu sehen, dass die Ergebnisse der von ihnen aufgestellten Näherungsformel für ε_{eff} von Stahlpulver gut mit vergleichbaren Messdaten korrelieren. Daher wird dieser Ansatz dazu verwendet, den Emissionskoeffizienten des zum Elektronenstrahlschmelzen verwendeten Pulverwerkstoffs 1.4404 zu bestimmen.

Die Emission von Wärmestrahlung an die Umgebung findet nicht nur von den Oberflächen der im Pulverbett oberliegenden Partikel statt. Auch die Zwischenräume weisen Oberflächen der darunterliegenden Teilchen auf, die über die identische Temperatur verfügen und zur Wärmestrahlung beitragen. Demnach gilt für den effektiven Emissionskoeffizienten ε_{eff} die folgende Beziehung:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = A_Z \varepsilon_Z + (1 - A_Z) \varepsilon_k \quad (86)$$

In obiger Gl. (86) bezeichnet A_Z den Anteil der Pulverbetttoberfläche mit Zwischenräumen und ε_k den Emissionskoeffizient des kompakten Werkstoffs. Mit der Schüttungsporosität ψ (vgl. Tabelle 4 auf Seite 96) lässt sich die Fläche A_Z nach SIH & BARLOW (1995) wie folgt berechnen:

$$A_Z = \frac{0,908\psi^2}{1,908\psi^2 - 2\psi + 1} \quad (87)$$

Die Faktoren in obiger Gl. (87) ergeben sich nach GERMAN (1996), der in seiner Arbeit den Flächenanteil der Zwischenräume geometrisch beschreibt. Der Emissionskoeffizient der Zwischenräume ε_Z ist abhängig vom Emissionskoeffizienten ε_k des kompakten Werkstoffs sowie von ψ und berechnet sich nach SIH & BARLOW (1995) gemäß:

$$\varepsilon_Z = \frac{\varepsilon_k \left[2 + 3,082 \left(\frac{1-\psi}{\psi} \right)^2 \right]}{\varepsilon_k \left[1 + 3,082 \left(\frac{1-\psi}{\psi} \right)^2 \right] + 1} \quad (88)$$

Werden die Gl. (87) und (88) in Gl. (86) eingesetzt, lässt sich der temperaturabhängige Verlauf des Emissionskoeffizienten ε_{eff} des Pulvers bestimmen (vgl. Abbildung 47).

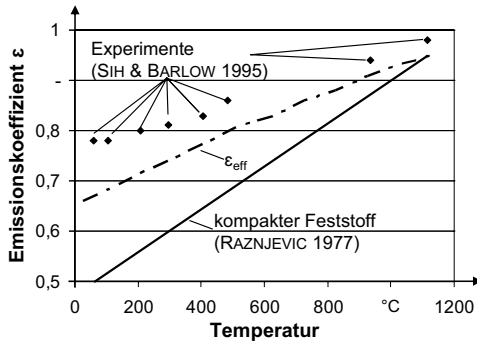


Abbildung 47: Verlauf des effektiven Emissionskoeffizienten von Pulverwerkstoff 1.4404 und von kompaktem Feststoff 1.4404 sowie Vergleich mit Experimenten nach SIH & BARLOW (1995)

Der Verlauf der nach dem Modell von SIH & BARLOW (1995) bestimmten Werte wurde für den untersuchten Pulverwerkstoff 1.4404 ermittelt. Dafür wurde der zur Berechnung notwendige Emissionskoeffizient des kompakten Feststoffs RAZNJEVIC (1977) entnommen. Für den Bereich der Schmelze wird der Emissionskoeffizient in Übereinstimmung mehrerer Quellen zu 0,29 gesetzt (BLANKE 1989; RAZNJEVIC 1977). Bei der Abkühlung aus der flüssigen Phase gilt analog zur effektiven Wärmeleitfähigkeit bzw. zur relativen Werkstoffdichte (s. o.), dass die Pulverform aufgelöst ist und daher die entsprechenden Werte des verfestigten Materials (vgl. Abbildung 47) zu verwenden sind.

Der effektive Emissionskoeffizient ϵ_{eff} des Pulverwerkstoffs 1.4404 wird zur Berechnung der Verluststrahlung nach Gl. (38) benötigt. Damit ist eine Randbedingung der Wärmeleitungsgleichung (36) gegeben. Die weiteren, im Vorangehenden ermittelten, temperaturabhängigen Verläufe der Kennwerte c_{eff} , λ_{eff} und ρ_{rel} sind hingegen Materialdaten, die unmittelbar in Gl. (36) substituiert werden. Bei Anwendung der resultierenden komplexen Wärmeleitungsgleichung auf die zeitlich veränderliche Geometrie der Prozesszone (vgl. Abbildung 36) folgt daraus, dass eine geschlossene analytische Bestimmung des stationären Temperaturfeldes nicht vorgenommen werden kann (vgl. Unterabschnitt 4.3.4; BAEHR & STEPHAN 1998). Entsprechend der zugrunde liegenden Methode (vgl. Abbildung 23 auf Seite 45) wurden daher die den thermischen Prozess beschreibenden Gleichungen in ein FEM-Simulationsmodell implementiert und numerisch gelöst. Im folgenden Kapitel wird dies erläutert.

4.4 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Das Kapitel 4 hat zum Ziel, ein Verständnis für die ablaufenden Prozesse beim Elektronenstrahlschmelzen zu schaffen. Dabei umfasst die Modellierung zwei grundlegende Schwerpunkte. Zunächst wurde mit Hilfe experimenteller Analysen der unerwünschte Effekt des Pulververblasens detailliert untersucht und die ermittelten Vorgänge in zwei charakteristische Phasen unterteilt. Somit wurde, aufbauend auf dem Stand der Technik, die mathematische Formulierung relevanter Kraftwirkungen auf die Pulverpartikel ermöglicht. Damit konnten in der Folge die beeinflussenden Prozessgrößen bzw. optimierte Werte selbiger identifiziert werden. Wie im folgenden Kapitel ausgeführt wird, kann durch die Anpassung der ermittelten Prozessparametereinstellungen im Rahmen einer experimentellen Versuchsreihe das Pulververblasen unterbunden werden.

Im weiteren Verlauf von Kapitel 4 wurde das durch den Elektronenstrahl erzeugte stationäre Temperaturfeld im Pulverwerkstoff untersucht. Für die als prozessbeschreibend identifizierten Gleichungen ist eine analytische Lösung nicht möglich. Daher dienen sie als Ausgangsbasis für die im nächsten Kapitel 5 beschriebene numerische Lösung. Der Nachweis der Gültigkeit von Modellierung und Simulation wird abschließend in Kapitel 6 erbracht, indem Vorgaben zur Vermeidung der Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* vorgestellt und anhand von Experimenten evaluiert werden.

5 Numerische Lösung des thermischen Prozessmodells

5.1 Allgemeines

Im Folgenden wird das thermische Prozessmodell aus Kapitel 4, welches bisher in Form von mathematischen Gleichungen vorliegt, einer numerischen Lösung zugeführt. Auf diese Weise kann das instationäre Temperaturfeld bestimmt werden. Dazu erfolgte die Implementierung der zuvor definierten Wärmeleitungsgleichung, Grenzbedingungen, Wärmequelle sowie der effektiven Werkstoffkennwerte in eine geeignete Simulationsumgebung. Das erstellte FEM-Modell wurde beispielhaft gelöst und mit Hilfe von experimentellen Temperaturmessungen validiert. Somit kann die Temperaturverteilung in der Prozesszone bei der Beaufschlagung mit Strahlenergie bestimmt und visualisiert werden. Auf diese Weise sind Erkenntnisse im Hinblick auf ausgewählte Prozessgrößen zur Vermeidung von Schmelztropfenbildung und Schichtablösung möglich. Aus einer Vielzahl in Frage kommender Prozessparameterkombinationen wurden daraufhin diejenigen bestimmt, mit denen günstige Prozessergebnisse in Kapitel 6 zu erzielen sind.

5.2 Implementierung des thermischen Prozessmodells

5.2.1 Idealisierung der realen Aufgabenstellung

Im Hinblick auf die Reduktion der Berechnungszeit einer FEM-Simulation steht zunächst die Bestimmung eines für die Problemstellung relevanten Ausschnitts der Prozesszone im Vordergrund. Dazu wird entsprechend der in Abbildung 36 eingeführten Bilanzhülle für das Elektronenstrahlschmelzen eine maßgebliche FEM-Geometrie aus einem beispielhaften Bauteil freigeschnitten (vgl. Abbildung 48).

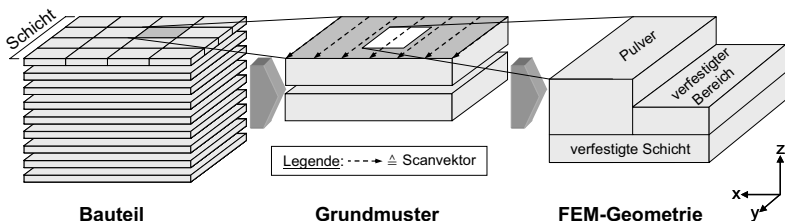


Abbildung 48: Freischneiden einer für das Elektronenstrahlschmelzen repräsentativen FEM-Geometrie

Wie bereits Unterabschnitt 1.5.3 veranschaulicht, setzt sich die beim Elektronenstrahlschmelzen vom Strahl beaufschlagte Querschnittsfläche eines Bauteils aus sog. Grundmustern zusammen. Beispielsweise können hierfür einzelne Quadrate, wie in Abbildung 48 dargestellt, zur Beschreibung eines beliebigen Bauteilquerschnitts aneinander gefügt werden. Die Grundmuster sind i. d. R. in Bezug auf ihre Abmessungen sowie auf die darin enthaltenen Scanvektoren nahezu identisch. Daher wird im ersten Schritt ein repräsentatives Grundmuster aus dem Bauteilquerschnitt betrachtet. Zur Füllung des selbigen kommen unidirektionale Scanvektoren innerhalb des quadratischen Grundmusters zum Einsatz. Alternativ existieren weitere Füllmöglichkeiten. Beispielsweise kann der Elektronenstrahl entsprechend einer Spirale oder mäanderförmig entlang äquidistanter Scanvektoren abgelenkt werden. In den meisten Fällen sind zwei benachbarte Scanvektoren allerdings parallel angeordnet.

Im zweiten Schritt wird aus dem Grundmuster ein repräsentatives Volumen freigeschnitten. Da die Ausdehnung der resultierenden Schmelzbadgeometrie in allen drei Raumrichtungen zu untersuchen ist, wird eine dreidimensionale FEM-Geometrie gewählt. Diese ist quaderförmig und erstreckt sich in vertikaler Richtung von der obersten Pulverschicht bis zum darunterliegenden, bereits verfestigten Bereich. In der horizontalen Ebene überragt die Ausdehnung in Richtung der Scanvektoren diejenige quer dazu, um den erwarteten länglichen Schmelzbadgeometrien aufgrund der bewegten Wärmequelle Rechnung zu tragen. Entsprechend Abbildung 48 (rechts) besitzt die Oberseite der gewählten FEM-Geometrie eine Stufe. Dies repräsentiert sowohl die Erhöhung des Pulverbereichs im Vergleich zum aufgeschmolzenen Feststoff mit geringerer Dichte als auch das sukzessive Verfestigen von Pulver durch aneinandergereihte Scanvektoren. Weitere Idealisierungen, beispielsweise hinsichtlich der Wärmequelle oder der effektiven Kennwerte des Pulverwerkstoffs, werden nicht vorgenommen.

5.2.2 Erstellung des Simulationsmodells

FEM-Geometrie und Materialdaten

Bei der Modellerstellung werden alle Daten festgelegt, die bei der Arbeit mit der Simulation nicht verändert werden sollen. Damit sind diese Eingaben einmalig definiert und unterscheiden sich von verschiedenen Lastfällen sowie von variablen Randbedingungen, die mit Hilfe des Modells zu untersuchen sind (GROTH & MÜLLER 2007). Der Fokus liegt zunächst auf der Bestimmung einer Modellgeometrie, auf der die Simulation aufbaut. Wie Abbildung 48 (rechts) zeigt, sind hierzu bereits die Konturen des für die Untersuchung relevanten Körpers bekannt. Allerdings bedürfen die exakte Modellgeometrie sowie die Zuweisung von Materialeigenschaften und sonstiger innerer Zustände, z. B. der Wärmeübergänge, einer weiteren Detaillierung (vgl. Abbildung 49). Die ange-

gegebenen Zahlenwerte hängen dabei von den zu untersuchenden Prozessparametereinstellungen ab, die im Rahmen von Unterabschnitt 5.2.3 näher erläutert werden.

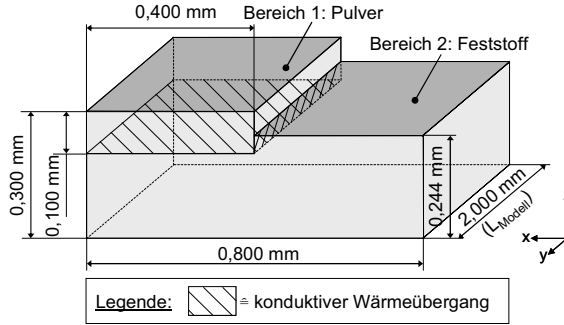


Abbildung 49: Grundmaße und innere Zustände des FEM-Geometriemodells

Die Gesamtlänge des Simulationsmodells ergibt sich aus den erwarteten Schmelzbadabmessungen in y-Richtung von unter 1 mm (GUSAROV et al. 2007; VAN ELSSEN et al. 2007). Um die Auswirkungen einer möglichst großen Bandbreite an Prozessparameterwerten auf das Schmelzbad vollständig abbilden zu können, wird diesbezüglich ein Wert von $L_{\text{Modell}} = 2,000$ mm festgelegt. Da der Energieeintrag durch den Elektronenstrahl bei der Berechnung des Temperaturfeldes vollständig berücksichtigt werden soll, resultieren die weiteren Dimensionen der Modellgeometrie aus der Ausdehnung der Wärmequelle im Werkstoff. Dies bedeutet, dass ein Durchmesser des Strahlauftreffbereichs von 0,4 mm sowie eine maximale Eindringtiefe von 0,062 mm (vgl. Unterabschnitt 4.3.6) in jedem Fall von der Modellgeometrie umschrieben werden muss.

Im Rahmen der Simulation wird für die Höhe der Pulverschicht mit 0,100 mm ein üblicher Wert für die laser- und elektronenstrahlbasierte generative Fertigung gewählt und im weiteren Verlauf nicht verändert (vgl. Unterabschnitt 3.4.2 bzw. Tabelle 6 auf Seite 119). Bezug nehmend auf Abbildung 49 gibt dieser Wert das vertikale Abmaß von *Bereich 1* (aufzuschmelzendes Pulver) wieder. Die Gesamthöhe des Modells von 0,300 mm folgt aus der Annahme, dass sich das resultierende Schmelzbad bis in die darunterliegenden bzw. verfestigten Schichten ausdehnt. Die dafür gewählte Dicke von 0,200 mm übersteigt diejenige der Pulverschicht um den Faktor zwei und verfügt für eine exakte Temperaturanalyse damit über eine genügend große Ausdehnung.

Im benachbarten Abschnitt ohne Pulverschicht beträgt die Höhe des Modells 0,244 mm. Damit wird berücksichtigt, dass der Pulverwerkstoff bereits aufgeschmolzen ist und somit als kompakter Feststoff vorliegt. Der damit einhergehenden Zunahme der relativen Dichte in Höhe von 56 % wird mit einer entsprechend reduzierten Schichthöhe Rechnung getragen. Dieses mit *Bereich 2* (vgl. Abbildung 49) bezeichnete Gebiet der Mo-

dellgeometrie hat eine Gesamtbreite von 0,800 mm. An den Kontaktflächen zwischen den beiden o. g. Bereichen liegt ein konduktiver Wärmeübergang vor.

Grenzbedingungen

Nachdem bisher ausschließlich die inneren Zustände des Simulationsmodells festgelegt wurden, ist seine Interaktion mit der Umgebung noch weitgehend unbestimmt. Zur vollständigen Definition müssen daher allen Außenflächen thermische Eigenschaften zugewiesen werden. Gemäß Unterabschnitt 5.2.1 verfügt die Modellgeometrie erstens über Bereiche mit Kontakt zur Umgebung. Zweitens grenzen insbesondere die nach oben gerichteten Flächen direkt an das in der Umgebung herrschende Vakuum. Dementsprechend werden unterschiedliche Randbedingungen zugeordnet (vgl. Abbildung 50).

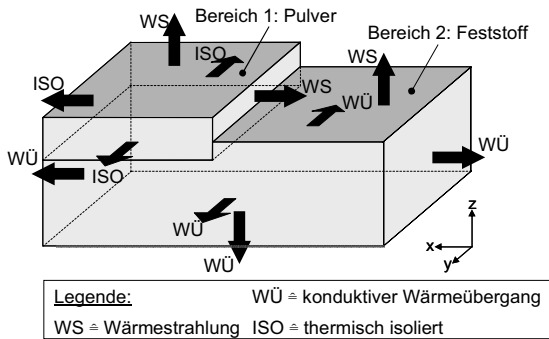


Abbildung 50: Randbedingungen für das FEM-Geometriemodell

Für den *Bereich 2* (vgl. Abbildung 50) gilt, dass an den vertikal gerichteten Außenflächen sowie an der Unterseite ein konduktiver Wärmeübergang vorliegt, da die Modellgeometrie gemäß Abbildung 48 (rechts) aus dem umgebenen Werkstoff freigeschnitten wird. Die zugrunde liegenden Gleichungen für die Randbedingungen können Unterabschnitt 4.3.5 entnommen werden. An den ebenfalls vertikal gerichteten Außenflächen von *Bereich 1* herrschen grundsätzlich die gleichen Bedingungen wie bei *Bereich 2*. Aufgrund der äußerst niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Pulverwerkstoffs in Höhe von ca. 0,1 W/(mK) (vgl. Abbildung 45) werden diese Flächen in der Simulation jedoch als thermisch isoliert betrachtet. Daraus folgt, dass hier kein Wärmestrom auftritt. Abschließend müssen die Zustände an den Außenflächen ohne direkten Kontakt zum angrenzenden Material betrachtet werden. Dafür gilt, wie bereits in Unterabschnitt 4.3.5 ausgeführt, dass dem Werkstück dort Energie durch Wärmestrahlung verloren geht.

Die Grenzbedingungen beziehen sich wegen der durchzuführenden transienten Simulation neben den o. g. Randbedingungen auch auf die zeitlichen Zustände. Aufgrund der Tatsache, dass der ansonsten übliche Prozessschritt *Pulver vorheizen* entfällt (vgl. Un-

terabschnitt 6.2.2), wird dem *Bereich 1* und dem *Bereich 2* (vgl. Abbildung 50) als Startwert die Umgebungstemperatur (25 °C) zugeordnet.

Vernetzung

Zur bereichsweisen Lösungsfindung (vgl. Unterabschnitt 3.2.4) muss das Simulationsmodell in diskrete Elemente unterteilt werden, deren Eckpunkte durch sog. Knoten miteinander verbunden sind (GROTH & MÜLLER 2007). Die Verknüpfung dieser Knoten wird als *Vernetzung* bezeichnet und ist für die oben vorgestellte Modellgeometrie in Abbildung 51 wiedergegeben.

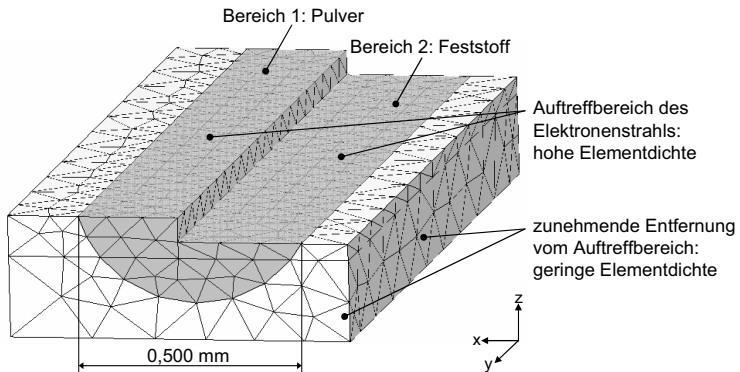


Abbildung 51: Vernetzung des FEM-Geometriemodells

Die Festlegung einer Elementform bzw. -größe und der mit dem gewählten Elementtyp verbundene Grad der Ansatzfunktion beeinflussen die erzielbare Genauigkeit bzw. den Berechnungsaufwand der Simulation erheblich. Der mit *Bereich 1* bezeichnete Abschnitt des Geometriemodells (vgl. Abbildung 49) umfasst, wie bereits erläutert, die Pulverschicht, deren Dichte beim Aufschmelzen plötzlich ansteigt. Das damit einhergehende Absenken der Pulverschicht, d. h. ihre Bewegung in negativer z-Richtung, wird durch ein bewegliches Netz nach der ALE-Methode realisiert. Mit der ALE-Methode (Arbitrary Lagrangian-Eulerian¹²) ist die Kopplung der Lösung einer partiellen Differentialgleichung mit einer problemabhängigen und parametrisierbaren Netzverformung möglich. Dies wird am Simulationsmodell dahin gehend genutzt, dass bei Überschreiten des Schmelzpunktes des Pulverwerkstoffs die Knoten im *Bereich 1* in vertikaler Richtung bis auf die oberste Ebene der verfestigten Schicht nach unten versetzt werden. Da dieser Vorgang real nicht sprunghaft abläuft, wird hierzu ein Übergangsbereich zwischen Solidus- und Liquidustemperatur definiert. Auf diese Weise ist es möglich, den

¹² Numerische Lösungsmethode, welche Formulierungen von Lagrange und Euler verbindet

Einflüssen der durch den Aufschmelzvorgang geänderten geometrischen Rahmenbedingungen auf das Temperaturfeld Rechnung zu tragen.

In Bezug auf die Elementaufteilung ist die optimale Wahl in starkem Maße von den problemspezifischen Gegebenheiten abhängig. Im untersuchten Fall kommen, wie allgemein für Temperaturfeldberechnungen üblich, Elemente mit einer linearer Ansatzfunktion zur Anwendung, d. h. die Ansatzfunktion für die FEM-Berechnung ist ein Polynom ersten Grades (GROTH & MÜLLER 2000).

Für die tatsächliche Vernetzung der Modellgeometrie mit Tetraederelementen ist darauf zu achten, dass Knoten besonders dort engmaschig zu setzen sind, wo hohe Wärmestromdichten und damit ausgeprägte Temperaturgradienten zu erwarten sind. Beim Elektronenstrahlschmelzen ist dies, wie Abbildung 51 zeigt, vorrangig in der Nähe des Auftreffbereichs des Elektronenstrahls der Fall. Mit dieser erhöhten Elementdichte besteht gleichzeitig die Möglichkeit, die Ausdehnung des Schmelzbades im Detail zu untersuchen. Mit zunehmender Entfernung werden zur Reduktion der Knotenanzahl größere Elemente gewählt. Die damit verbundene Vergröberung des Netzes lässt sich aufgrund geometrischer Gegebenheiten mit Tetraedern einfach realisieren (BRAESS 2007). Dabei ist darauf zu achten, dass die Kanten der Elemente möglichst gleich lang sind und dass spitze Winkel zwischen den Kanten vermieden werden. Allgemein gilt, dass der Diskretisierungsfehler mit zunehmender Elementdichte geringer ist und somit das Simulationsergebnis genauer wird. Eine extreme Verdichtung des Netzes kann allerdings eine Verschlechterung der Ergebnisse mit sich bringen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei vielen Elementen die Summe aus Diskretisierungs- und Numerikfehler wieder ansteigen kann (GROTH & MÜLLER 2007).

5.2.3 Lösung des Simulationsmodells

Lastaufprägung

Im Gegensatz zu den bisher getroffenen Modellfestlegungen umfasst der aktuelle Unterabschnitt vor allem solche Spezifikationen, die bei der Arbeit mit der Simulation aufgabenspezifischen Änderungen unterliegen. Dies bezieht sich primär auf den zu untersuchenden Lastfall, d. h. die jeweilige Scangeschwindigkeit und die Strahlleistung. Beide Größen werden bei der Anwendung des Simulationsmodells systematisch variiert und daher für einen Simulationsversuch jeweils konstant gehalten. Die Energieeinbringung durch den Strahl stellt einen von außen auf das Modell wirkenden Einfluss auf die Knoten bzw. auf die Elemente dar, der korrekt berücksichtigt werden muss.

Für den konkreten Fall ist in Abbildung 52 die Lage des zur Lastaufprägung relevanten Scanvektors wiedergegeben. Damit wird die Bahn der im vorangehenden Kapitel definierten Wärmequelle bei der Translation in der Pulverschicht bezeichnet.

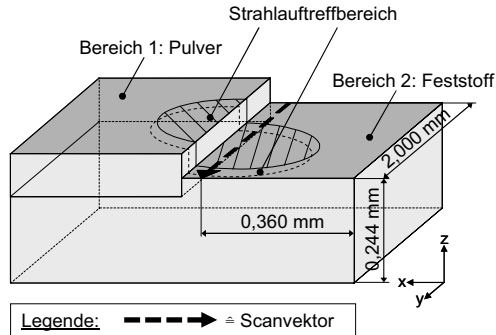


Abbildung 52: Lage des Scanvektors in Bezug auf das FEM-Geometriemodell

Der Scanvektor liegt in der nach oben orientierten Außenfläche von *Bereich 2* und zeigt in Richtung der positiven y-Achse. Da für die simulationsgestützten Untersuchungen ein Durchmesser des Strahlauftreffbereichs von 0,4 mm (s. o.) sowie eine Überlappung der aktuellen mit der vorherigen Strahlbahn von 60 % gewählt wird, resultiert daraus ein Abstand des Scanvektors von der rechten vertikalen Kante von 0,360 mm (vgl. Abbildung 52). Die Wärmequelle nach Gl. (65) definiert eine volumenbezogene Wärmestromdichte und koppelt ihre Energie in negativer z-Richtung in den Werkstoff ein.

Durch die Anwendung des Simulationsmodells mit verschiedenen Parametereinstellungen soll ein Prozessverständnis für die ablaufenden Vorgänge beim Elektronenstrahlschmelzen gewonnen werden. Dazu wird im Folgenden erläutert, welche Einstellungen der Prozessparameter für die Simulationsläufe zum Einsatz kamen.

Versuchsplan

Die gleichzeitige Veränderung aller Eingangsgrößen des Elektronenstrahlschmelzens bringt eine enorme Komplexität der Berechnungen mit sich. Bei der Anwendung des hier vorgestellten Simulationsmodells wurden die Strahlleistung P_B sowie die Scangeschwindigkeit v_s variiert. Damit konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung des Einflusses dieser beiden, von verschiedenen Autoren für die strahlbasierte Fertigung als maßgeblich bewerteten, Eingangsgrößen (vgl. Unterabschnitt 3.4.2 sowie u. a. KRUTH et al. 2005; YADROITSEV et al. 2007). Bei der Auswahl der genannten Werte war entscheidend, ein möglichst breites Spektrum der Parameter P_B und v_s abzudecken. Als Ausgangsbasis zur Definition der Variationsstufen für die Größen P_B und v_s dienten Angaben aus der einschlägigen Literatur für die, hinsichtlich des Funktionsprinzips vergleichbare, laserstrahlbasierte Fertigung (u. a. GUSAROV et al. 2007; ROMBOUTS et al. 2009). Da der Strahlleistung sowie der Scangeschwindigkeit jeweils vier Einstel-

lungen zwischen 90 W und 200 W bzw. 25 mm/s und 200 mm/s zugewiesen wurden, ergaben sich in Summe 16 einzelne Simulationsversuche (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Versuchsplan zur Durchführung von Simulationsexperimenten

lfd. Nr.	Strahl- leistung P_B [W]	Scan- geschwindigkeit v_s [mm/s]	lfd. Nr.	Strahl- leistung P_B [W]	Scan- geschwindigkeit v_s [mm/s]
1	90	25	9	150	25
2	90	50	10	150	50
3	90	100	11	150	100
4	90	200	12	150	200
5	110	25	13	200	25
6	110	50	14	200	50
7	110	100	15	200	100
8	110	200	16	200	200

Bezug nehmend auf Tabelle 1 existieren neben den o. g. Parametern P_B und v_s noch weitere Eingangsgrößen für das Elektronenstrahlschmelzen. Sofern der jeweilige Faktor in Unterabschnitt 3.4.2 nicht als irrelevant bewertet wurde, erfolgte für die Simulationsexperimente die Zuweisung eines unveränderlichen Wertes. Um die Übertragbarkeit der Einstellungen dieser Prozessparameter in die Realität sicherzustellen, wurden dieselben Werte konsequenterweise auch für die im weiteren Verlauf beschriebenen Versuchsreihen verwendet. In der folgenden Tabelle 6 sind die wichtigsten Konstanten zusammengefasst. Hierbei wird nur derjenige Teil aus Tabelle 1 mit Relevanz für das Simulationsmodell aufgelistet. Beispielsweise wurde im Rahmen des gewählten Geometriemodells das Scanmuster nicht variiert.

Tabelle 6: Konstant gehaltene Prozessparameter für die Simulationsversuche

Prozessparameter	Symbol	Werte	Einheit
Beschleunigungsspannung	U_A	100	kV
Strahlfleckdurchmesser	d_B	0,4	mm
Fokusslage	-	Unterhalb der Pulverschicht	-
Intensitätsverteilung	-	Normalverteilung	-
Pulversystem	-	Werkstoff: 1.4404, spratzig; Partikeldurchmesser: 10 - 60 μm	-
Schichthöhe	t_s	0,1	mm
Vorheiztemperatur	T_V	25	$^{\circ}\text{C}$
Anzahl der Scanwiederholungen	-	1	-
Hatch-Abstand	h	0,16	mm

Solvereinstellungen

Zur Lösung des linearen Gleichungssystems, welches aus den oben beschriebenen Eingaben resultiert, wurde der direkte Solver¹³ UMFPACK nach DAVIS (2004) verwendet. Dieser explizite Löseralgorithmus basiert auf dem Gaußschen Eliminationsverfahren und kommt vor allem bei Simulationsmodellen mit weniger als ca. 100.000 Freiheitsgraden in Betracht. Er eignet sich besonders zur Lösung von schlecht konditionierten Gleichungssystemen (COMSOL AB 2007). Damit wird ein mathematisch instabiler Zustand bezeichnet, bei welchem Matrizen derart aufgebaut sind, dass kleine Abweichungen in den Eingabegrößen zu großen Schwankungen in den Resultaten führen können (HERMANN 2006).

Da die thermischen Vorgänge in der Prozesszone beim Elektronenstrahlschmelzen transient ablaufen, ist eine Simulation in Abhängigkeit der Zeit unerlässlich. Im Rahmen dieser Analyse ist die Definition der zu berechnenden Zeitschritte von besonderer Bedeutung. Für das vorliegende Modell mit der Gesamtlänge $L_{\text{Modell}} = 2,000 \text{ mm}$ bestimmt die untersuchte Scangeschwindigkeit v_s sowie der Strahlfleckdurchmesser $d_B = 0,4 \text{ mm}$ die Simulationszeit t_{Sim} , d. h. die mittels Simulation zu untersuchende Zeitspanne, nach folgender Gl. (89):

$$t_{\text{Sim}} = \frac{L_{\text{Modell}} + d_B}{v_s} \quad (89)$$

¹³ Engl. für Löseralgorithmus (sinngem.)

Dem Simulationsmodell liegt zugrunde, dass die Wärmequelle zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ gerade noch keine thermischen Lasten auf das Modell ausübt. Einen Zeitschritt später tritt sie in das Modell ein und beaufschlagt die Knoten entsprechend des in Abbildung 52 dargestellten Scanvektors. Des Weiteren ist t_{sim} der Zeitpunkt, zu dem die Wärmequelle das Modell gerade verlassen hat. Der Zeitraum dazwischen wird für die Simulation in sog. Zeitschritte unterteilt. Die Zeitschrittweite $\Delta t_{\text{sim}} = 10^{-6}$ s richtet sich nach der geforderten zeitlichen Auflösung der Ergebnisse sowie nach der verwendeten Elementgröße. Als Folge dieser Festlegungen sowie aus Gl. (89) ergibt sich die in Tabelle 7 aufgeführte Anzahl der Zeitschritte für die verschiedenen Simulationsversuche.

Tabelle 7: Zeitschrittsteuerung für die Simulation des thermischen Prozesses beim Elektronenstrahlschmelzen

Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]	Simulationszeit t_{sim} [s]	Anzahl der Zeitschritte
25	0,096	96.001
50	0,048	48.001
100	0,024	24.001
200	0,012	12.001

Neben der Wahl der Zeitschrittweite wird die notwendige Berechnungsdauer auch von den Anforderungen an die relative und absolute Genauigkeit der Ergebnisse beeinflusst (COMSOL AB 2007). Diese Vorgaben steuern den zulässigen Fehler bei jedem Berechnungsschritt. Für $\{T\}$ als Lösungsvektor und E_i als geschätzter lokaler Fehler des Solvers in T_i muss für einen zulässigen Berechnungsschritt die folgende Gl. (90) gelten.

$$|E_i| \leq R_{\text{rel}} \cdot |T_i| + A_i \quad (90)$$

In obiger Formel ist A_i die absolute Genauigkeit für den Freiheitsgrad i und R_{rel} ist die relative Genauigkeit. Gl. (90) bedingt, dass der Betrag des geschätzten lokalen Fehlers den maximal möglichen Fehler, der sich aus den vorgegebenen relativen und absoluten Anteilen zusammensetzt, nicht überschreitet. Um dieses Kriterium für das gesamte Simulationsmodell zu überprüfen, verwendet der Solver auf der Basis von Gl. (90) die Formulierung des mittleren quadratischen Fehlers (vgl. Gl. (89)), wobei N die Anzahl der zu lösenden Freiheitsgrade bezeichnet:

$$\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_i \left(\frac{|E_i|}{A_i + R_{\text{rel}} |T_i|} \right)^2 \right)^{1/2} < 1 \quad (91)$$

Bevor mit dem vorgestellten Simulationsmodell Erkenntnisse zur Eliminierung der Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* erzielt werden können, muss seine Eignung zur Repräsentation des zu untersuchenden thermischen Prozesses überprüft

werden. Die Schritte zur dafür notwendigen Validierung sind dem folgenden Abschnitt zu entnehmen.

5.3 Validierung des Simulationsmodells

5.3.1 Allgemeines

Bei der Validierung wird sichergestellt, dass die Ergebnisse der Simulation mit realen Experimenten übereinstimmen. Wie bereits in Unterabschnitt 3.2.2 ausgeführt, kann von einer Deckungsgleichheit nur in einem aufgabenspezifischen Toleranzbereich ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass die vollständige Richtigkeit eines Modells prinzipiell nicht bewiesen werden kann. Vielmehr bezieht sich eine Validierung immer auf den jeweiligen Modellzweck. Im konkreten Fall beruht dieser darauf, die Temperaturverteilung in der Prozesszone beim Elektronenstrahlschmelzen derart zu bestimmen, dass Aussagen über die Geometrie des Schmelzbades möglich sind.

Zur Abschätzung der notwendigen Genauigkeit der Übereinstimmung von Modell und Realität dient die Kenntnis der Spanne zwischen Solidus- und Liquidustemperatur des betrachteten Werkstoffs 1.4404. Innerhalb dieses Übergangsbereichs von 45 K liegen neben dem bereits verflüssigten Anteil auch feste Bestandteile vor, wodurch die exakte Abgrenzung des realen Schmelzbades eingeschränkt ist (vgl. Unterabschnitt 4.3.7). Um dem o. g. Modellzweck zu entsprechen, wurde darauf aufbauend als Bedingung definiert, dass sich die Abweichung von Simulation und Experiment im gleichen Rahmen, d. h. im Bereich von 45 K, bewegen muss.

Die Erfassung der während des Elektronenstrahlschmelzens auftretenden Temperaturen ist verschiedenen Randbedingungen unterworfen. Geeignete Messkonzepte müssen insbesondere auf elektromagnetische Felder, Röntgenstrahlung, Vakuumumgebung und Temperaturen im Bereich über dem Schmelzpunkt angepasst sein. Neben diesen Aspekten erschweren bauliche Einschränkungen der vorhandenen Anlagentechnik, vor allem die Bleiverglasung der Bearbeitungskammer, den Einsatz von optischen Messverfahren, wie beispielsweise der Thermografie.

Unter Berücksichtigung der gegebenen Einschränkungen stellte die Verwendung von Thermoelementen eine zuverlässig zu realisierende Alternative dar. Diese Messmittel bestehen aus zwei unterschiedlichen und an einem Ende miteinander verbundenen Metallen. An den freien Enden der beiden Leiter wird bei einer Temperaturdifferenz aufgrund des sog. Seebeck-Effekts eine elektrische Spannung erzeugt (STÖCKER 2007). Wegen der hohen zu erwartenden Temperaturen wurde ein Thermoelement vom Typ S mit der Werkstoffpaarung Platin-Platin/Rhodium eingesetzt. Damit können Temperatu-

ren im Bereich von $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+1760\text{ }^{\circ}\text{C}$ erfasst werden (DIN EN 60584 1996). Zur Messung in der Nähe des Prozessortes diente der in Abbildung 53 skizzierte Aufbau.

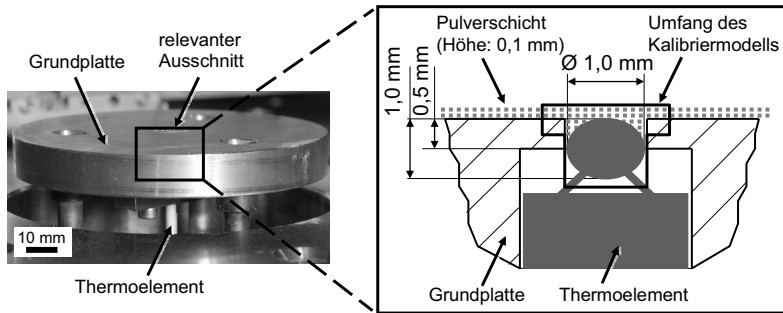


Abbildung 53: Aufbau zur Temperaturerfassung (links: Grundplatte mit Thermoelement; rechts: relevanter Ausschnitt der Einbausituation)

Eine standardmäßig verwendete Grundplatte zum Elektronenstrahlschmelzen wurde mittels einer konzentrischen Bohrung dahin gehend modifiziert, dass von der Unterseite ein Thermoelement montiert werden konnte. An der höchsten Stelle ist eine Bimetallkugel vom Durchmesser 1 mm angebracht, welche mit der Oberseite der Grundplatte abschließt und daher ebenfalls mit Pulver bedeckt ist. Über dem Thermoelement wurde als Scanmuster ein Quadrat mit 10 mm Kantenlänge im Sinne der Simulationseinstellungen (vgl. Unterabschnitt 5.2.2) ebenfalls konzentrisch zur Grundplatte platziert. Dieses Muster wurde zeilenweise in positiver y-Richtung gescannt (vgl. Abbildung 34).

Der gewählten Vorgehensweise liegt zugrunde, dass die höchste Temperatur dann erfasst wird, wenn sich der Strahl direkt über dem Thermoelement befindet und seine Energie somit nahezu vollständig an selbiges abgibt. Aufgrund der fehlenden Ortsauflösung des Messverfahrens wurde der ermittelte Wert im Anschluss dazu verwendet, um ihn nach der Maximalwertmethode mit den Simulationsergebnissen an der korrespondierenden Position in Bezug zu setzen. Im Fall der Schweißsimulation, einem Bereich mit vergleichbaren Anforderungen, stellt dieses Vorgehen nach RADAJ (1992) einen etablierten Ansatz zum Abgleich von Berechnungsergebnissen und Messungen dar.

5.3.2 Auswertung der Messergebnisse

Der Umfang der Experimente sollte aus Gründen des damit verbundenen Aufwands gering gehalten werden. Gleichzeitig ist es jedoch wichtig, die Übereinstimmung von Simulation und Realität in einem möglichst breiten Prozessparameterspektrum sicherzustellen. Demzufolge wurden nicht alle 16 Kombinationen aus Scangeschwindigkeit und Strahlleistung nach Tabelle 5 in Bezug auf die maximale Temperatur in der Prozesszone

untersucht. Im Sinne einer sinnvollen Reduktion der Einzelversuche wurde vielmehr angestrebt, alle in Unterabschnitt 5.2.3 aufgeführten Prozessparameter je einmal für die Validierungsmessungen zu verwenden. Daraus resultierten die in Tabelle 8 beschriebenen vier Einzelversuche.

Tabelle 8: Versuchsplan für die Temperaturmessungen zur Validierung des Simulationsmodells

		Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]			
		25	50	100	200
Strahlleistung P_B [W]	90	x			
	110		x		
	150			x	
	200				x

Da weder die Grundplatte noch die darüber platzierte Pulverschicht vorgeheizt wurden (vgl. Unterabschnitt 6.4.3), herrschte zu Beginn bei allen Messungen Raumtemperatur. Dementsprechend zeigten alle vier Verläufe in Abbildung 54 vergleichbare Startwerte im Bereich zwischen 22,7 °C und 25,4 °C. Die Messung startete bei $t_0 = 0$ s. Dies entspricht dem Zeitpunkt, zu dem der Elektronenstrahl mit dem Scannen des o. g. Grundmusterquadrates beginnt. Je nach eingestellter Scangeschwindigkeit v_s vergehen unterschiedlich lange Zeitspannen bis zum Erreichen der gemessenen Maximaltemperatur, da die Messspitze des Thermoelements zu unterschiedlichen Zeitpunkten vom Strahl beaufschlagt wird.

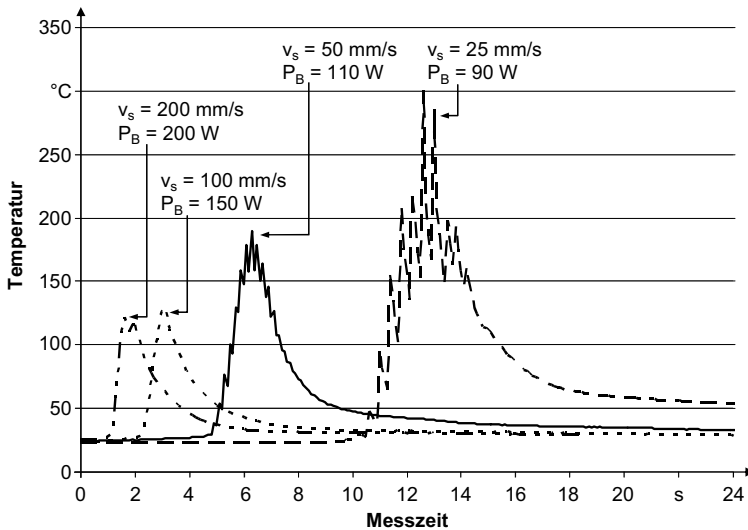


Abbildung 54: Verläufe der gemessenen Temperaturen

Es zeigt sich im obigen Diagramm, dass bei einer Scangeschwindigkeit von $v_s = 200 \text{ mm/s}$ die im Vergleich geringste Temperatur von $T_{vs200\max} = 121,1^\circ\text{C}$ bei $t_{vs200\max} = 1,575 \text{ s}$ resultiert. Bei einer Scangeschwindigkeit von $v_s = 100 \text{ mm/s}$ stellt sich nach $t_{vs100\max} = 3,15 \text{ s}$ ein Wert von $T_{vs100\max} = 129,4^\circ\text{C}$ ein. Des Weiteren folgt aus $v_s = 50 \text{ mm/s}$ ein Temperaturmaximum in Höhe von $T_{vs50\max} = 189,5^\circ\text{C}$. Der im Vergleich größte Temperaturwert von $T_{vs25\max} = 300,5^\circ\text{C}$ ergibt sich bei einer Scangeschwindigkeit von $v_s = 25 \text{ mm/s}$ zum Zeitpunkt $t_{vs25\max} = 12,6 \text{ s}$. Ausschließlich bei den beiden letztgenannten Kurven ist die Scangeschwindigkeit ausreichend niedrig, um aufgrund des mehrmaligen Tangierens des Messortes durch den Elektronenstrahl in Folge der parallel angeordneten Scanvektoren ein wiederholtes Aufheizen und Abkühlen im Temperaturverlauf erkennen zu können. Abschließend zeigt sich, dass der Abkühlvorgang umso länger dauert, je höher die gemessene Maximaltemperatur ist und je länger der Strahl benötigt, um das Grundmuster vollständig mit Energie zu beaufschlagen.

5.3.3 Kalibrierung des Simulationsmodells

Entsprechend Unterabschnitt 3.2.2 führt der Vorgang der Validierung zu einem Prüf- und Korrekturprozess, der solange iterativ durchlaufen wird, bis die Anforderungen an das Simulationsmodell erfüllt sind. Im vorliegenden Fall bedeutete dies, dass das Simulationsmodell dahingehend zu kalibrieren war, dass die berechneten Maximaltemperaturen mit den oben erfassten Werten innerhalb des festgelegten Toleranzrahmens über-

einstimmten. Ist dies der Fall, so kann für den beschriebenen Modellzweck von einem validierten Simulationsmodell ausgegangen werden.

Durch die Verwendung eines Thermoelementes und besonders aufgrund seiner Masse ergibt sich eine nicht zu vernachlässigende Änderung der Zustände in der Prozesszone. Unter Berücksichtigung von Gl. (62) auf Seite 93 gilt es festzuhalten, dass bei einer zugeführten Wärmemenge Q eine wesentlich höhere Temperatur T erfasst würde, wenn sowohl die Masse m der Messspitze, als auch ihre spezifische Wärmekapazität c möglichst klein wären. Um den Einfluss dieser zusätzlich zu erwärmenden Masse des Thermoelementes zu berücksichtigen, musste das der Simulation zugrunde liegende Geometriemodell im Hinblick auf die Kalibrierung entsprechend angepasst werden. Die Grundmaße des ursprünglichen Modells für die Parameterstudien (vgl. Unterabschnitt 5.2.2) blieben erhalten. Es wurden jedoch zusätzlich die Bimetallkugel aus den Materialien Platin und Rhodium sowie ein Abschnitt der beiden Anschlussleitungen des Thermoelementes berücksichtigt (vgl. Abbildung 55).

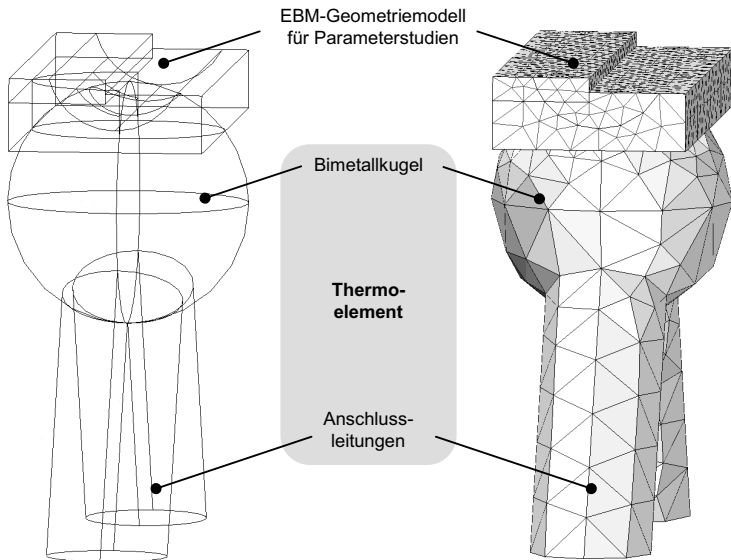


Abbildung 55: Geometrie (links) und Vernetzung (rechts) des um das Thermoelement erweiterten Simulationsmodells für die Kalibrierung

Wie im vorangehenden Unterabschnitt erläutert, werden mit dem Thermoelement Temperaturwerte zeitabhängig, jedoch nicht ortsaufgelöst erfasst. Die aktuelle Temperatur wird demnach von der gesamten Bimetallkugel (s. o.) erfasst. Als Konsequenz für die Simulation bedeutet dies, dass der Temperaturabgleich anhand des Mittelwertes der

Werte aller Knoten innerhalb der Messspitze durchzuführen ist. Das Thermoelement wurde bis zu den Anschlussleitungen (vgl. Abbildung 55) modelliert. Darüber hinaus erfahren diese Leiter keine wesentliche Temperaturänderung und wurden daher vernachlässigt.

Das Geometriemodell entsteht durch Freischneiden einer repräsentativen Prozesszone aus der jeweils obersten Pulverschicht (vgl. Abbildung 48). Das Vermögen des umgebenden Materials, Wärme aufzunehmen, ist neben der spezifischen Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit vor allem von seiner Masse und seinen geometrischen Gegebenheiten abhängig. Diese Faktoren beeinflussen den über die Feststoffgrenzen durch Wärmeleitung verloren gehenden Energiebetrag und wirken sich in bestimmten Grenzen auf die tatsächlich auftretenden Maximaltemperaturen aus. Den realen Bedingungen der Temperaturmessung in Höhe der Grundplatte muss daher unter Berücksichtigung des verwendeten quadratischen Scanmusters mit 10 mm Kantenlänge Rechnung getragen werden. Dies geschieht durch Anpassung des konduktiven Wärmeübergangs an den vertikalen Grenzflächen von *Bereich 2* (vgl. Abbildung 50 auf Seite 114) sowie an der Unterseite des Geometriemodells.

Zur Kalibrierung des Simulationsmodells wird nach Unterabschnitt 4.3.5 die Randbedingung 3. Art angepasst. Nach Gl. (40) auf Seite 86 muss dazu die Temperatur an den Grenzflächen sowohl auf der Innenseite (i) als auch auf der Außenseite (a) identisch sein. Da die Wärmeleitfähigkeit innerhalb des Prozessmodells als Materialeigenschaft $\lambda^{(i)}$ vorgegeben ist, ist die Variable $\lambda^{(a)}$ der zur Verfügung stehende Freiheitsgrad. Durch Zuweisen eines korrekten Betrags wird der Anteil der dissipierten Wärme derart beeinflusst, dass die berechneten Maximaltemperaturen den messtechnisch erfassten Werten innerhalb des gegebenen Toleranzrahmens entsprechen (vgl. Abbildung 56).

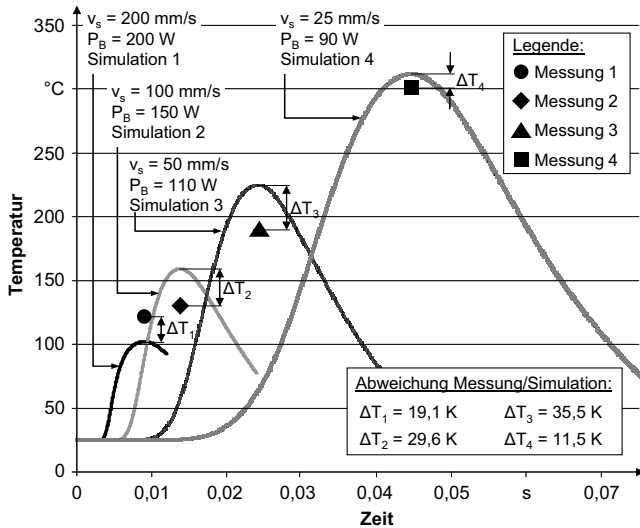


Abbildung 56: Vergleich von gemessenen Temperaturen und Simulationsergebnissen

In o. g. Abbildung 56 sind die simulierten Temperaturverläufe zusammen mit den messtechnisch bestimmten Maximaltemperaturen nach Abbildung 54 für die vier in Tabelle 8 aufgeführten Kombinationen aus Strahlleistung P_B und Scangeschwindigkeit v_s wiedergegeben. Die resultierenden Kurven sind durch einen steilen Anstieg gekennzeichnet und nehmen mit sinkender Scangeschwindigkeit höhere Maxima an. Die o. g. Maximaltemperaturen (vgl. Abbildung 54) werden mit dem jeweiligen Kurvenmaximum in Bezug gesetzt und es zeigt sich, dass die Simulationsergebnisse zum Teil oberhalb und zum Teil unterhalb der experimentell ermittelten Werte liegen. Die festgestellten Abweichungen betragen zwischen 11,5 K und 35,5 K und bewegen sich somit innerhalb des in Unterabschnitt 5.3.1 definierten Toleranzrahmens von 45 K.

Die Validierung des Simulationsmodells für den beabsichtigten Modellzweck ist abgeschlossen, indem die gefundenen Einstellungen für den Wärmeübergang an den Grenzflächen für das in Abschnitt 5.2 erstellte Simulationsmodell herangezogen werden. Darauf basierend können durch die im Folgenden beschriebene Modellanwendung relevante Erkenntnisse für die Realität gewonnen werden.

5.4 Anwendung des Simulationsmodells zur Vermeidung von Schmelztropfenbildung und Schichtablösung

5.4.1 Allgemeines

Die primäre Größe, nach der mit dem erstellten Simulationsmodell gelöst wird, ist die Temperatur. Im Speziellen bezieht sich die Berechnung auf den zeitabhängigen Verlauf aller Knotentemperaturen innerhalb des FEM-Modells. Im Hinblick auf die Vermeidung der Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* sind, wie in Kapitel 2 beschrieben, jedoch vorrangig die folgenden abgeleiteten Kennwerte relevant:

- Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB}
- Kontaktbreite des Schmelzbades zur verfestigten Schicht B_K
- Einschmelztiefe in die verfestigte Schicht T_E

Diese Größen werden in der folgenden Abbildung 57 mit Hilfe verschiedener Ansichten des Simulationsmodells erläutert. Der obere Abschnitt (a) zeigt eine perspektivische Darstellung des FEM-Geometriemodells für die Parameterstudien. Neben dem vom Strahl erzeugten Schmelzbad kann die Dichtezunahme des Pulversystems während des Aufschmelzvorgangs sowie die damit verbundene Absenkung erkannt werden. Im unteren Abschnitt sind ausschließlich die Bereiche mit einer Temperatur von über 1430 °C, dem Schmelzpunkt des verwendeten Werkstoffs 1.4404, in Graustufen markiert. Damit kann das Schmelzbad vom restlichen Werkstoff unterschieden werden.

Dem Ausschnitt (b) der Abbildung 57 kann die Draufsicht auf das Geometriemodell entnommen werden. Die Länge des Schmelzbades $L_{Schmelzbad}$ ist dabei definiert als die maximale Ausdehnung des o. g. Temperaturbereichs parallel zur Bewegungsrichtung des Strahles. Diese ist im Modell durch die y-Achse gegeben. Entsprechend verhält es sich mit der Schmelzbadbreite $B_{Schmelzbad}$, welche als maximale Ausdehnung der flüssigen Phase quer zum Scanvektor definiert ist und sich entlang der x-Achse erstreckt (vgl. Abbildung 57). Aus diesen beiden Größen, $L_{Schmelzbad}$ und $B_{Schmelzbad}$, lässt sich das Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB} nach Gl. (92) berechnen.

$$V_{LB} = \frac{L_{Schmelzbad}}{B_{Schmelzbad}} \quad (92)$$

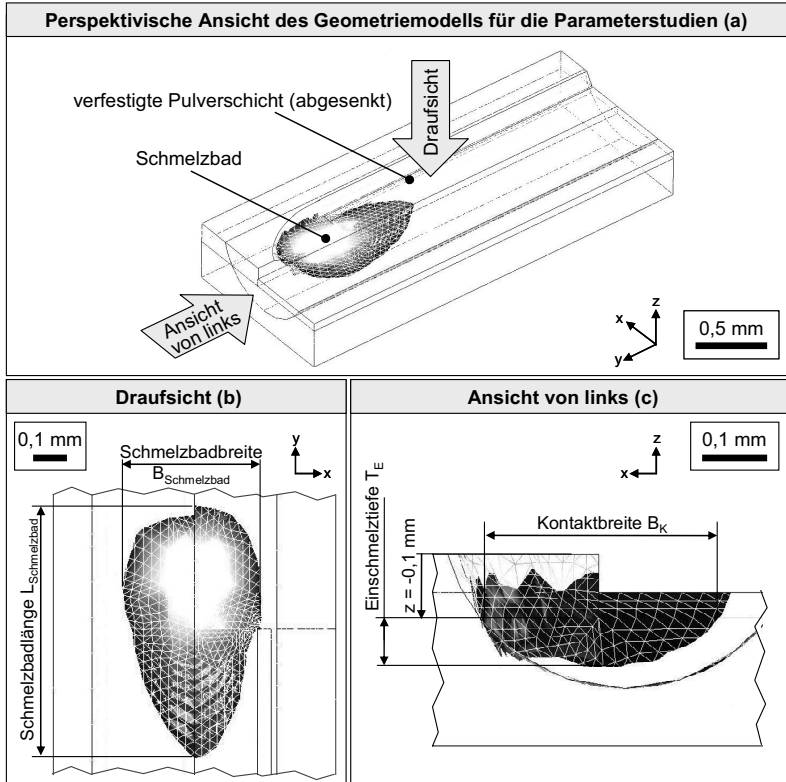


Abbildung 57: Ableitung von Kennwerten aus den Simulationsergebnissen

In Abbildung 57 zeigt der Ausschnitt (c) den Querschnitt des Simulationsmodells in der Ansicht von links. Dabei ist das Schmelzbad als deutlich von der restlichen Geometrie abgegrenzt dargestellt. Es ist zunächst erkennbar, dass sich das Schmelzbad im genannten Ausschnitt nicht nur über die oberste Schicht erstreckt, sondern sich auch in die darunterliegende Schicht ausdehnt. Diese Schicht hat ihre obere Kante bei der Koordinate $z = -0,1$ mm. An der Kontaktfläche zwischen der aktuell aufgeschmolzenen Pulverschicht und der vorangehenden festen Schicht findet die Anbindung des aufgeschmolzenen Materials statt. Auf dieses Maß bezieht sich die Kontaktbreite des Schmelzbades B_K . Darüber hinaus wird die Tiefe der Ausdehnung in z -Richtung, ausgehend von der o. g. Kante, als Einschmelztiefe T_E definiert. Da kleine Beträge dieser Variablen mit einer ungenügenden Verbindung aufeinanderfolgender Schichten einhergehen, ist T_E eine Kenngröße für Schichtablösung (vgl. Unterabschnitt 2.4).

5.4.2 Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB}

Entsprechend des in Abschnitt 2.3 wiedergegebenen Standes der Erkenntnisse ist der Quotient V_{LB} aufgrund von Schmelzbadinstabilitäten ein wichtiges Kriterium für das Auftreten von Schmelztropfenbildung. Alle simulativ ermittelten Werte für V_{LB} (vgl. Abbildung 58) betragen zwischen 1,02 und 1,67 und es zeigt sich, dass die Beträge mit steigender Scangeschwindigkeit v_s zunehmen. In diesem Fall steht weniger Wärme zur weiteren Ausdehnung des Schmelzbads quer zur Bewegungsrichtung zur Verfügung und daher ergibt sich eine schmalere Geometrie desselben. Ein Anstieg des betrachteten Quotienten V_{LB} ist ebenso bei einer Erhöhung der Strahlleistung P_B zu verzeichnen. Die Ursache für diese Abhängigkeit liegt darin begründet, dass mit ansteigender Strahlleistung auch ein höheres Temperaturniveau am Prozessort resultiert, welches dazu führt, dass die flüssige Metallphase eine längere Zeitspanne zur Erstarrung benötigt und das Schmelzbad daher länglich ausfällt.

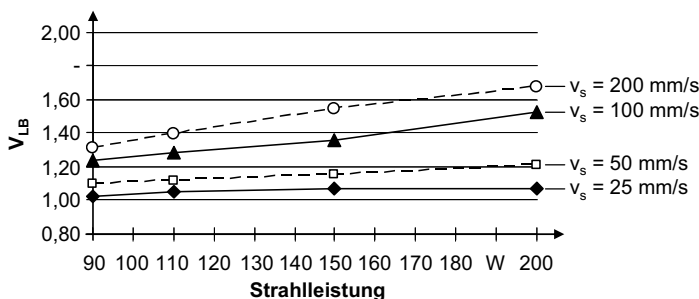


Abbildung 58: Berechnetes Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB}

Wie bereits in Unterabschnitt 2.3.3 erläutert, kann kein exakter Grenzwert für das Verhältnis V_{LB} zur Vermeidung der Schmelztropfenbildung angegeben werden. Nichtsdestotrotz lässt sich festhalten, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit mit sinkendem Quotienten V_{LB} bei ansonsten unveränderten Eingangsgrößen zurückgeht. Da der Einfluss der Scangeschwindigkeit im Vergleich zu den untersuchten Strahlleistungen dominiert, kann für die experimentelle Umsetzung in Kapitel 6 schlussgefolgert werden, dass insbesondere hohe Beträge für v_s bei den gegebenen Randbedingungen, wie z. B. dem Strahlfleckdurchmesser und der Scanstrategie (vgl. Tabelle 6), zu vermeiden sind.

5.4.3 Kontaktbreite des Schmelzbades B_K

Ähnlich wie beim obigen Kennwert V_{LB} unterliegt auch die Kontaktbreite des Schmelzbades B_K (vgl. Abbildung 57) einer Abhängigkeit von den im Rahmen der Arbeit untersuchten Eingangsgrößen Strahlleistung P_B und Scangeschwindigkeit v_s . Allerdings ist

der Einfluss von v_s so, dass sich bei hohen Scangeschwindigkeiten geringere Ergebnisse für B_K einstellen (vgl. Abbildung 59). Besonders bei einer Scangeschwindigkeit von $v_s = 200$ mm/s differieren die resultierenden Kontaktbreiten deutlich in Abhängigkeit des eingestellten P_B -Wertes. Geringe Kontaktbreiten lassen darauf schließen, dass die durch den Elektronenstrahl eingebrachte Energiedichte zu gering ist, um genügend Wärme an der Kontaktfläche zwischen Pulvermaterial und verfestigter Schicht bei $z = -0,1$ mm zur Verfügung zu stellen, welche zum Aufschmelzen über die gesamte Schmelzspurbreite führt.

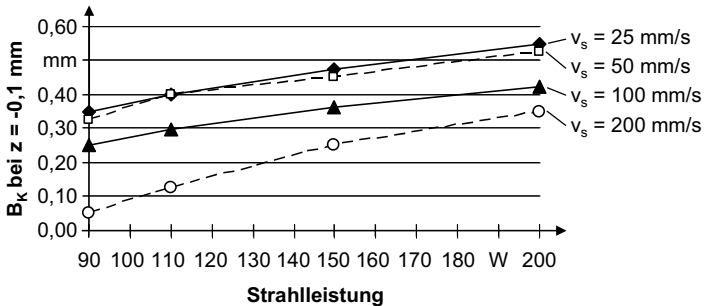


Abbildung 59: Berechnete Kontaktbreite des Schmelzbades B_K bei $z = -0,1$ mm

Wie bereits in Unterabschnitt 2.3 ausgeführt, neigt die Schmelze bei geringen Kontaktbreiten B_K dazu, sich von dem darunterliegenden Trägermaterial zu lösen und in Form von Tropfen zu erstarren, sofern die Oberflächenspannung des flüssigen Werkstoffs den Grenzwert für eine vollständige Benetzung der verfestigten Schicht übersteigt. Die Prozessparameter v_s und P_B sind aus diesem Grund so zu wählen, dass die Breite des Kontaktbereiches B_K den Durchmesser des Strahlaufreffbereichs nicht unterschreitet. Auf diese Weise werden ein vollständiges Verfestigen der 0,4 mm breiten Schmelzspur sowie die Erzeugung einer umfassenden metallurgischen Anbindung ermöglicht. Generell gilt nur bei sieben der 16 untersuchten Parameterkonstellationen, dass $B_K \geq 0,4$ mm, d. h. die Kontaktbreite entspricht mindestens dem Strahlfleckdurchmesser und damit der Schmelzspurbreite. Für die weitere Anwendung des Simulationsmodells schließt sich im Folgenden die Auswertung der rechnerisch ermittelten Einschmelztiefe T_E an.

5.4.4 Einschmelztiefe T_E

Die Einschmelztiefe T_E , d. h. die größte Ausdehnung des Schmelzbades in den darunterliegenden Bereich, zeigt Abbildung 60. Die erzielten Werte von T_E variieren zwischen 0,03 mm und 0,14 mm. Ein Wert von $T_E = 0,043$ mm sagt beispielsweise aus, dass die untere Feststoffschicht in ihrer z -Ausdehnung (vgl. Abbildung 57) durch den in die darüber liegende Pulverschicht einwirkenden Elektronenstrahl verflüssigt wird.

Die errechnete Einschmelztiefe steigt mit abnehmender Scangeschwindigkeit v_s sowie mit zunehmender Strahlleistung P_B . Dies bedeutet, dass eine höhere eingekoppelte Energiedichte durch steigendes P_B oder sinkendes v_s dazu führt, dass mehr Wärme in Richtung der darunterliegenden Schicht abgeführt wird und dort zur Überschreitung der Liquidustemperatur des Werkstoffs zur Verfügung steht. Umso weiter sich das Schmelzbad nach unten ausdehnt, desto ausgeprägter ist nach GUSAROV et al. (2007) die metallurgische Anbindung der Schichten. Damit kann das in der Fertigung befindliche Werkstück den beim Abkühlen zunehmend auftretenden Eigenspannungen und der damit einhergehenden Neigung zum Aufbiegen eine genügend große Widerstandskraft entgegensetzen und Schichtablösung auf diese Weise vermieden werden.

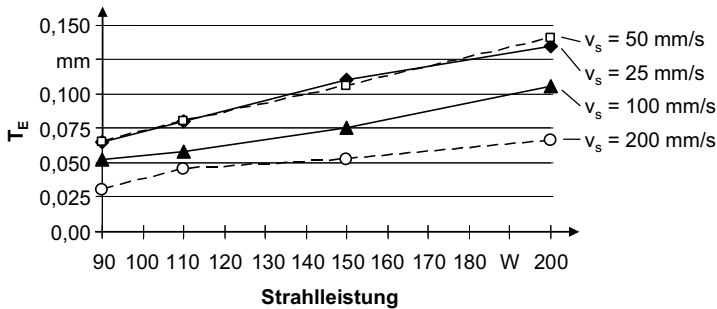


Abbildung 60: Berechnete Einschmelztiefe T_E in vertikaler Richtung, ausgehend von der Pulverschichtoberseite

Analog zur Schmelzbadgeometrie (vgl. Unterabschnitt 5.4.2) gibt es auch für die Einschmelztiefe T_E in der einschlägigen Literatur, beispielsweise für das SLM, keinen empirisch ermittelten Grenzwert. Es kann jedoch festgehalten werden, dass im Hinblick auf die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität der generativ gefertigten Bauteile, insbesondere bei Überhängen, die Maximierung von T_E nicht zielführend ist. Vielmehr wird angestrebt, mindestens die darunterliegende Schicht erneut aufzuschmelzen.

Gleichzeitig muss vermieden werden, dass eine tiefe, aber zu schlanke Einschmelzung, welche zu einem ungenügenden Schichtverbund führen kann, fälschlicherweise als ausreichend beurteilt wird. Um diese Fehlinterpretation der Ergebnisse auszuschließen, folgt zur Vermeidung von Schichtablösung, dass die Einschmelztiefe zwischen ein und zwei Schichthöhen des verfestigten Materials umfassen muss. Im konkreten Fall betrug, auf Basis einer Pulverschichtdicke von 0,1 mm, die Höhe der verfestigten Schicht 0,044 mm. Daraus ergibt sich, dass die Einschmelztiefe zwischen 0,044 mm und 0,088 mm umfassen muss. Als Kriterium wird daher der Mittelwert aus dieser oberen und unteren Grenze herangezogen. Daher sollte die Einschmelztiefe $T_E \geq 0,066$ mm betragen, um Schichtablösung zu vermeiden. Wie die Simulationsergebnisse zeigen (vgl.

Abbildung 60), kann für sich isoliert betrachtet keiner der verwendeten Werte für die Scangeschwindigkeit v_s und für die Strahlleistung P_B ausgeschlossen werden, das o. g. Kriterium zu erfüllen.

5.5 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Das Kapitel 5 beschreibt zunächst die Implementierung des analytischen Prozessmodells der thermischen Abläufe beim Elektronenstrahlschmelzen aus Abschnitt 4.3 in ein rechnergestütztes Simulationsmodell. Bevor damit Aussagen über die Vermeidung der Fehlerbilder *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* getroffen werden können, wurde es validiert, um mit experimentell erfassten Temperaturwerten bestmöglich übereinzustimmen. Bei der Anwendung des Simulationsmodells wurden alle in den Unterabschnitten 2.3 und 2.4 definierten Kennwerte, d. h. das Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB} , die Kontaktbreite des Schmelzbades B_K sowie die Einschmelztiefe T_E , ausgewertet.

Es zeigte sich die Schlüssigkeit der Simulationsergebnisse zunächst in Bezug auf die Schmelztropfenbildung. Obwohl der Literatur kein exakter Grenzwert für V_{LB} entnommen werden kann, ergeben die berechneten Werte für die Kontaktbreite des Schmelzbades, dass im Zusammenhang mit den untersuchten Strahlleistungen insbesondere Scangeschwindigkeiten über 100 mm/s nicht zum Aufschmelzen der vollständigen Schmelzspurbreite führen und daher Schmelztropfenbildung zu erwarten ist. Für die Schichtablösung gilt, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit mit zunehmender Einschmelztiefe abnimmt. Um eine möglichst ausgeprägte schmelzmetallurgische Verbindung aufeinander folgender Schichten zu gewährleisten, sollte die Einschmelztiefe mindestens zwischen ein und zwei Schichthöhen des verfestigten Materials betragen.

Die ermittelten Wertebereiche für die Strahlleistung P_B sowie für die Scangeschwindigkeit v_s erscheinen im Vergleich zur allgemeinen Leistungsfähigkeit der Elektronenstrahltechnik gering. Bei einer Bewertung sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die berechneten Ergebnisse für ein Standardscanmuster sowie für eine Vielzahl weiterer Eingangsgrößen (vgl. Tabelle 6) ermittelt wurden. Bei einer Optimierung dieser bisher als konstant angenommenen Größen ist eine Erhöhung der o. g. Beträge von P_B bzw. v_s realistisch. Darüber hinaus wird in Kapitel 6 mit der Mehrstrahltechnik eine weitere Option zur Nutzung der Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens vorgestellt. Zunächst werden im Folgenden allerdings die Ergebnisse des Simulationsmodells und der entsprechenden Schmelzversuche gegenübergestellt. Damit kann bestimmt werden, inwieweit die berechneten Kennwerte mit experimentellen Ergebnissen übereinstimmen und das Simulationsmodell zur Abbildung der real ablaufenden Prozesse geeignet ist.

6 Umsetzung der Modellierung und Wirtschaftlichkeitsabschätzung

6.1 Vorgehensweise im Kapitel

Das Kapitel 6 behandelt zunächst die praktische Umsetzung der mathematischen Modellierung sowie der Simulationsergebnisse im Hinblick auf die untersuchten Fehlerbilder der *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung*. Im Anschluss steht die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der im Rahmen der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse im Vordergrund.

In Bezug auf das Pulververblasen wurde der in Abschnitt 4.2 ermittelte, qualitative Einfluss der als relevant bewerteten Eingangsgrößen experimentell quantifiziert. Die Zielsetzung bestand dabei in der Eliminierung des unerwünschten Fehlerbildes. In Abschnitt 6.3 schließen sich Versuche zur Pulververfestigung an, wobei Schmelztropfenbildung und Schichtablösung zu vermeiden waren. In diesem Zusammenhang wurde zunächst die Übereinstimmung von Simulationsergebnissen und experimentellen Vorversuchen überprüft. Auf dieser Basis wird ein Parameterfenster vorgestellt, welches den Bereich ohne Schmelztropfenbildung und Schichtablösung kennzeichnet. Um die Anwendbarkeit der erzielten Einsicht-Ergebnisse auf dreidimensionale Körper zu demonstrieren, wurde zunächst eine einfache Regelgeometrie verwendet, welche frei von den zu eliminierenden Fehlerbildern war. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Herstellung weiterer Bauteile mit Elektronenstrahlschmelzen wurde abschließend durch Probekörper mit Gitterstrukturen nachgewiesen.

Im zweiten Teil des Kapitels werden die erzielbaren Herstellkosten zunächst mit dem zuvor erreichten Entwicklungsstand des Elektronenstrahlschmelzens in Bezug gesetzt und anschließend denen des Laserstrahlschmelzens gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Weiterentwicklung des Elektronenstrahlschmelzens im Hinblick auf die Mehrstrahltechnik (vgl. Unterabschnitt 1.4.1) ein hohes Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Bauteilfertigung birgt.

6.2 Eliminierung des Pulververblasens

6.2.1 Versuchskonzept

Um einen Abgleich der mathematischen Modellierung des Pulververblasens mit der Realität zu erreichen, mussten experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden.

Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, sind insbesondere die folgenden Parameter dabei als relevant in Bezug auf das Auftreten des Verblasens zu erachten:

- Strahlstrom I_B
- Beschleunigungsspannung U_A
- Strahlfleckdurchmesser d_B
- Partikelform des Pulverwerkstoffs
- Vorheiztemperatur T_V

Der Schwerpunkt der hier beschriebenen Versuchsplanung lag darauf, möglichst unterschiedliche Einflüsse der Eingangsgrößen zu evaluieren. Auf Basis von Vorversuchen (u. a. SIGL et al. 2006) konnten für die Planung der experimentellen Untersuchungen Wertebereiche vorgegeben werden. Diese Einstellungen weisen ein hohes Maß an Praxisbezug auf und gewährleisten gleichzeitig die Beurteilbarkeit des entsprechenden Einflusses auf den unerwünschten Effekt des Pulververblasens. Zu diesem Zweck wurden die oben ausgewählten Eingangsgrößen I_B , U_A , d_B , T_V sowie die Partikelform jeweils auf zwei unterschiedlichen Stufen variiert. Bei Durchlaufen aller Kombinationen im Sinne eines vollfaktoriellen Versuchsplans ergaben sich damit insgesamt $2^5 = 32$ Parametervariationen. Da diese Anzahl mit einem begrenzten Aufwand realisierbar ist, wurden alle Einzelversuche durchlaufen. Wiederholungen des Versuchsplans waren nicht vorgesehen.

Der Versuchsgegenstand besteht darin, den Strahl bei jedem Einzelversuch über einen Zeitraum von zehn Sekunden auf dem vorgegebenen Wert zu halten bzw. bei Auftreten des Verblasens umgehend durch manuellen Eingriff zu deaktivieren. Für den Fall, dass innerhalb der vorgegebenen Zeitspanne kein Verblasen auftrat, wurde der Einzelversuch beendet und das Pulver galt als nicht verblasen. Um die Komplexität der Versuche zu begrenzen, wurde der Elektronenstrahl während dieser Zeitspanne weder in Bezug auf seine Leistung noch hinsichtlich seiner Auftreffposition variiert. Letztgenannte wurde so gewählt, dass der Strahl das Pulver im Zentrum der Schicht beaufschlagte.

Um die o. g. Temperatur T_V zu erzielen, wurde das Vorheizen der Pulverschicht entsprechend des Standes der Erkenntnisse (vgl. Unterabschnitt 3.3.3) mittels Elektronenstrahl realisiert. Dabei wurde der Strahl stark defokussiert, d. h. $d_B \gg 1,0$ mm, über das Pulverbett in Form einer Kreisfläche abgelenkt. Der Durchmesser der Kreisfläche betrug 80 mm und die Kreisfigur wurde durch 1000 Koordinatenpaare definiert. Diese Punkte wurden mit einer Frequenz von 500 Hz angesteuert, d. h. die gesamte Kreisfläche wurde pro Sekunde 500-mal mit dem Strahl gescannt. Währenddessen stieg der Strahlstrom einer linearen Funktion folgend, ausgehend vom Startwert 0 mA, pro Sekunde um 0,2 mA. Dies geschah solange, bis die definierte Vorheiztemperatur der Pul-

verschicht erreicht war. Die Höhe der Pulverschicht betrug 0,1 mm und sie wurde auf einer Grundplatte mit 100 mm Durchmesser und 10 mm Höhe vor jedem Einzelversuch platziert. Die Grundplatte war auf der Unterseite durch ein Kupferkabel (Querschnittsfläche 1,5 mm²) an die Erdung der Anlage angeschlossen.

6.2.2 Versuchsergebnisse

Entsprechend der oben beschriebenen Versuchsplanung wurden die Eingangsgrößen I_B , U_A , d_B , T_V sowie die Partikelform jeweils auf zwei Stufen variiert (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Planung und Ergebnisse der Versuche zum Pulververblasen

Ifd. Nr.	Partikel-form	T _V [°C]	d _B [mm]	I _B [mA]	U _A [kV]	Verblasen		Zeitpunkt des Pulververblasens
						ja	nein	
1	spratzig	25	0,4	0,5	100		x	-
2	spratzig	600	0,4	5,0	60		x	-
3	spratzig	600	0,2	0,5	100		x	-
4	spratzig	25	0,4	0,5	60		x	-
5	spratzig	25	0,2	5,0	100	x		nach dem Vorheizen
6	spratzig	600	0,2	5,0	60		x	-
7	spratzig	25	0,2	0,5	60	x		nach dem Vorheizen
8	spratzig	25	0,2	5,0	60	x		nach dem Vorheizen
9	spratzig	600	0,2	0,5	60		x	-
10	spratzig	25	0,2	0,5	100	x		nach dem Vorheizen
11	spratzig	25	0,4	5,0	100	x		nach dem Vorheizen
12	spratzig	25	0,4	5,0	60	x		nach dem Vorheizen
13	spratzig	600	0,2	5,0	100		x	-
14	spratzig	600	0,4	5,0	100		x	-
15	spratzig	600	0,4	0,5	60		x	-
16	spratzig	600	0,4	0,5	100		x	-
17	kugelig	600	0,4	0,5	100	x		während des Vorheizens
18	kugelig	600	0,2	0,5	60	x		während des Vorheizens
19	kugelig	25	0,4	0,5	100	x		nach dem Vorheizen
20	kugelig	25	0,4	5,0	60	x		nach dem Vorheizen
21	kugelig	25	0,4	0,5	60	x		nach dem Vorheizen
22	kugelig	25	0,2	0,5	100	x		nach dem Vorheizen
23	kugelig	600	0,2	0,5	100	x		während des Vorheizens
24	kugelig	600	0,4	5,0	100	x		während des Vorheizens
25	kugelig	600	0,2	5,0	60	x		während des Vorheizens
26	kugelig	25	0,2	5,0	100	x		nach dem Vorheizen
27	kugelig	600	0,4	5,0	60	x		während des Vorheizens
28	kugelig	25	0,2	0,5	60	x		nach dem Vorheizen
29	kugelig	25	0,4	5,0	100	x		nach dem Vorheizen
30	kugelig	600	0,4	0,5	60	x		während des Vorheizens
31	kugelig	600	0,2	5,0	100	x		während des Vorheizens
32	kugelig	25	0,2	5,0	60	x		nach dem Vorheizen

Ein Schwerpunkt der Versuchsplanung lag darauf, unbekannte Störfaktoren auf die Versuchsbedingungen annähernd gleich zu verteilen. Dies lässt sich nach KLEPPMANN (2009) neben einer Blockbildung insbesondere mit einer Randomisierung der Abfolge von Einzelversuchen erreichen. Um den Aufwand für die Umrüstung der Elektronenstrahlanlage auf einen anderen Werkstoff zu reduzieren, wurde diese Blockbildung durch die zusammengefasste Verwendung eines jeweiligen unterschiedlichen Pulverwerkstoffs (kugelig bzw. spratzig) realisiert. Innerhalb dieser beiden Blöcke ergab sich die o. g. stochastische Abfolge entsprechend Tabelle 9. Neben der reinen Versuchsplanung sind in dieser Tabelle zugleich die Ergebnisse der Einzelversuche aufgeführt.

Bei der Analyse der Ergebnisse ist zunächst auffällig, dass das Verblasen der Pulverschicht aus kugeligen Partikeln weder bei Raumtemperatur noch bei einer Vorheiztemperatur von $T_V = 600\text{ °C}$ vermieden werden konnte. Vielmehr wurde beobachtet, dass das Pulver bereits während des Vorheizrschrittes zu verblasen begann. Eine Beaufschlagung mit den jeweils in den Einzelversuchen geplanten Strahleinstellungen war in der Folge nicht mehr möglich. Im Gegensatz dazu trat das unerwünschte Phänomen bei spratzigem Pulver und einer Vorheiztemperatur von $T_V = 600\text{ °C}$ nicht auf. Des Weiteren ließ sich auch für eine zunehmende Defokussierung des Elektronenstrahls ein positiver Einfluss nachweisen. Wurde der Strahlfleckdurchmesser auf $d_B = 0,4\text{ mm}$ vergrößert, so konnte damit bei sechs Einzelversuchen das Verblasen unterbunden werden. Bei einem Durchmesser von $d_B = 0,2\text{ mm}$ wurde hingegen in nur vier Experimenten das Verblasen vermieden. Ein vergleichbarer Einfluss kam der Verringerung des Strahlstroms von $I_B = 5,0\text{ mA}$ auf $I_B = 0,5\text{ mA}$ zu. Dementgegen war der Einfluss der Beschleunigungsspannung weniger ausgeprägt. Hier stand dem Pulververblasen bei fünf Einzelversuchen mit $U_A = 100\text{ kV}$ das viermalige Auftreten des Fehlerbildes bei $U_A = 60\text{ kV}$ entgegen.

Da das Verblasen bei kugeligem Pulver stets auftrat, ist der Einfluss der Partikelform besonders ausgeprägt. Mit Bezug auf die in Unterabschnitt 4.2.4 vorgestellte analytische Prozessmodellierung des Phänomens führte dies zur Schlussfolgerung, dass der damit einhergehenden Reduktion des elektrischen Widerstands des Systems *Pulverschicht-Grundplatte* eine größere Bedeutung zukommt als der Verringerung der entsprechenden Kapazität durch den Vorheizrschritt. Die ausschließliche Verwendung von spratzigen Pulversystemen ist im Umkehrschluss allerdings nicht das alleinige Kriterium für das Vermeiden des unerwünschten Phänomens. Besonders das Vorheizen der Pulverschicht ist als relevant einzustufen. Dies führt jedoch zur Ausbildung von mechanischen Verbindungen zwischen den einzelnen Partikeln. Die damit einhergehende Festigkeitszunahme der Pulverschicht in Bereichen außerhalb des Bauteils ist allerdings als negativ zu bewerten, da bei der Nacharbeit eines Bauteils ein erhöhter Aufwand zur Entfernung des nicht benötigten Rohmaterials zu tragen ist.

Als Handlungsempfehlung lässt sich zur Eliminierung des Pulververblasens daher schlussfolgern, dass vorrangig Pulverwerkstoffe mit spratzigen Partikeln für das Elektronenstrahlschmelzen zu verwenden sind. Um manuelle Tätigkeiten im Anschluss an die generative Fertigung zu reduzieren, sollte zudem auf das Vorheizen der Pulverschicht verzichtet werden. Dies ist möglich, wenn der Strahlfleckdurchmesser zu $d_B = 0,4$ mm gewählt wird. In diesem Zusammenhang stellt die mit den Einzelversuchen 1 und 4 (vgl. Tabelle 9) nachgewiesene Möglichkeit zur Eliminierung des Vorheizschrittes, aufgrund der damit einhergehenden Reduktion der Baujobdauer, eine entscheidende Optimierung des Prozessablaufs beim Elektronenstrahlschmelzen dar.

6.3 Eliminierung von Schmelztropfenbildung und Schichtablösung

6.3.1 Vorversuche

Analog zum vorangehenden Abschnitt wurde auch das thermische Prozessmodell bzw. die darauf basierende Simulation und deren Aussagen überprüft. Entsprechend der Zielsetzung der Arbeit (vgl. Unterabschnitt 1.5.1) sollte damit unter Beweis gestellt werden, dass dreidimensionale Bauteile ohne Schmelztropfenbildung und Schichtablösung herstellbar sind. Zur Integration der Ergebnisse aus der Untersuchung des Pulververblasens wird die zentrale Erkenntnis aus Abschnitt 6.2, d. h. die Möglichkeit der Pulververfestigung bei Raumtemperatur und damit ohne Vorheizschritt, miteinbezogen.

Zur experimentellen Umsetzung kam wiederum der Versuchsplan nach Tabelle 5 (vgl. Unterabschnitt 5.2.3) zur Anwendung. Folglich wurden 16 Kombinationen ausgewählter Scangeschwindigkeiten und Strahlleistungen evaluiert. Dabei waren neben positiven ebenso negative Prozessergebnisse, wie etwa Unebenheiten der verfestigten Schicht, zu erwarten. Durch diese Unebenheiten kann beispielsweise die Bewegung der Klinge beim anschließenden Materialauftrag nicht dauerhaft sichergestellt werden. Um untereinander vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde daher die erste Pulverschicht als Basis zur Beurteilung des Auftretens von Schmelztropfenbildung und Schichtablösung verwendet. Im Sinne einer effizienten Versuchsdurchführung kam eine Grundplatte mit Durchmesser 100 mm zum Einsatz, auf welcher 16 Quadrate mit einer Kantenlänge von 10 mm angeordnet waren. Die Quadrate wurden mit unterschiedlichen Einstellungen entsprechend den Randbedingungen der Simulation (vgl. Tabelle 6) durch den Strahl beaufschlagt werden. Die Ergebnisse dieses Experimentes zeigt Abbildung 61.

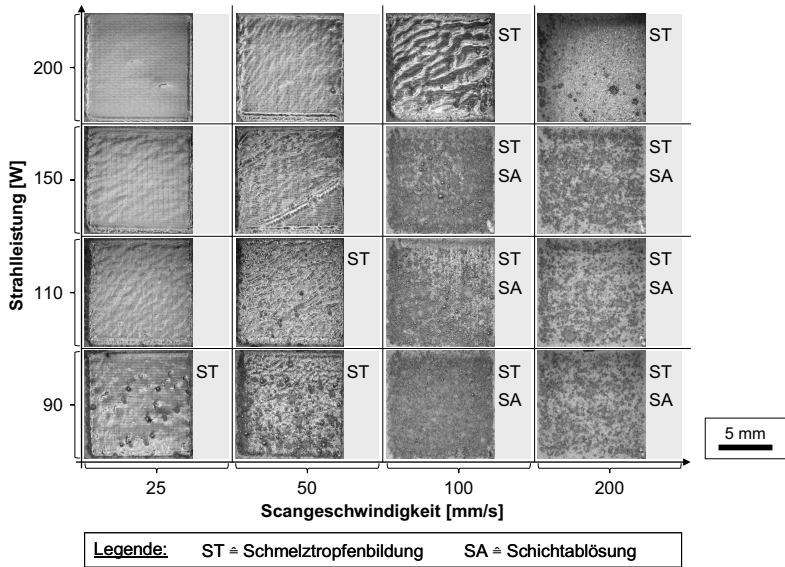


Abbildung 61: Ergebnisse der Vorversuche mit einer Pulverschicht

In Abbildung 61 sind die Versuchsergebnisse mit Schmelztropfenbildung (ST) und Schichtablösung (SA) gekennzeichnet. Neben fehlerfreien Quadraten wiesen einige Schmelztropfen auf, die sich vor allem hinsichtlich Größe und Anzahl unterscheiden. Im Bereich zunehmender Scangeschwindigkeit war bis zu einer Strahlleistung von 150 W zusätzlich Schichtablösung erkennbar. Dieser Umstand ist dadurch gekennzeichnet, dass keine Anhaftung des zu verfestigenden Pulvers auf der darunterliegenden Schicht stattfindet. Als Folge konnte der darunterliegende Werkstoff in den Bereichen zwischen den Schmelztropfen visuell erfasst werden. Im Gegensatz zu diesen Parameterkombinationen war bei einer maximalen Strahlleistung von 200 W stets genügend Energie vorhanden, um zusätzlich die Oberfläche der Grundplatte aufzuschmelzen und auf diese Weise Schichtablösung zu unterbinden.

Neben der phänomenologischen Auswertung und Interpretation der Vorversuche ist insbesondere der Abgleich mit den Simulationsergebnissen von besonderem Interesse. Diese Gegenüberstellung folgt in Unterabschnitt 6.3.2.

6.3.2 Vergleich der Vorversuche mit Simulationsergebnissen

Die o. g. Ergebnisse zur beobachteten Schichtablösung auf der Basis von Vorversuchen entsprechen nahezu vollständig den simulierten Ergebnissen zu der Einschmelztiefe T_E

aus Unterabschnitt 5.4.4. Abgesehen von der zu hoch berechneten Einschmelztiefe von $T_E = 0,075$ mm für $P_B = 150$ W und $v_s = 100$ mm/s lagen die Ergebnisse für alle Wertepaare mit Schichtablösung im realen Experiment unterhalb des Grenzwertes von $T_E = 0,066$ mm (vgl. Abbildung 60 und Abbildung 61). Somit musste für diese Parameterkombinationen von Schichtablösung ausgegangen werden und das Simulationsmodell zeigte damit eine korrekte Vorhersage der realen Zustände.

In Bezug auf das Fehlerbild *Schmelztropfenbildung* mussten mit dem Verhältnis aus Schmelzbadlänge zu Schmelzbadbreite V_{LB} sowie der Kontaktbreite des Schmelzbades B_K zwei verschiedene Kenngrößen mit den Ergebnissen der Vorversuche abgeglichen werden. Tatsächlich waren nach Abbildung 59 die berechneten Werte für B_K bei sechs Parameterkombinationen (vgl. Tabelle 10) mindestens so groß wie der Grenzwert zur Schmelztropfenvermeidung von 0,40 mm (vgl. Unterabschnitt 5.4.3).

Tabelle 10: Wertepaare aus P_B und v_s mit berechneten Kontaktbreiten $B_K \geq 0,40$ mm

Strahlleistung P_B [W]	110	150	200	110	150	200
Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]	25	25	25	50	50	50
Berechnete Kontaktbreite B_K [mm]	0,40	0,48	0,55	0,40	0,45	0,53

Wird exakt für diese sechs Wertepaare die Schmelzbadgeometrie in der Draufsicht ausgewertet, so resultiert daraus, dass V_{LB} ausschließlich Werte im unteren Bereich der möglichen Ergebnisse, d. h. zwischen 1,05 und 1,21 annimmt. Das Auftreten von Schmelztropfen bei $P_B = 110$ W bzw. $v_s = 50$ mm/s (vgl. Abbildung 61) erklärt sich aus der ungünstigen Kombination aus der Kontaktbreite $B_K = 0,40$ mm und einem Wert von $V_{LB} = 1,12$. Obwohl sich bei $P_B = 110$ W und $v_s = 25$ mm/s ebenfalls ein Wert von $B_K = 0,40$ mm ergab, entstanden hierbei keine Schmelztropfen. Die Ursache ist in einer vergleichsweise gedrungenen Schmelzbadgeometrie zu sehen, da $V_{LB} = 1,05$ betrug. Zwar ist bei anderen Wertepaaren ohne Schmelztropfenbildung V_{LB} größer (vgl. Abbildung 58). Jedoch überstieg B_K in diesen Fällen den o. g. Wert von 0,40 mm. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass nicht nur jeweils einer der Kennwerte Kontaktbreite B_K oder Schmelzbadverhältnis V_{LB} singulär über das Auftreten von Schmelztropfen entscheidet. Wie gezeigt werden konnte, ist vielmehr die Kombination daraus relevant. Aus diesem Grund müssen zur Vermeidung der Schmelztropfenbildung die Prozessparameter derart gewählt werden, dass sich eine möglichst große Kontaktbreite des Schmelzbades sowie gleichzeitig ein möglichst breites und kurzes Schmelzbad ergeben. Damit ist auch in Bezug auf das Fehlerbild *Schmelztropfenbildung* die Eignung des in Kapitel 5 erstellten Simulationsmodells zur Berechnung relevanter Prozesskenngrößen in Bezug auf die in Unterabschnitt 1.5.1 formulierte Zielsetzung nachgewiesen.

6.3.3 Prozessparameterfenster für das Elektronenstrahlschmelzen

Wie bereits in Unterabschnitt 2.3 beschrieben, existieren für das Laserstrahlschmelzen sog. Prozessparameterfenster in Abhängigkeit der primären Faktoren Scangeschwindigkeit und Strahlleistung. Damit lassen sich Parameterbereiche mit den angestrebten Prozessergebnissen von solchen mit Defiziten unterscheiden und übersichtlich darstellen. Im vorliegenden Fall wurden hierfür die Erkenntnisse der Vorversuche aus dem Unterabschnitt 6.3.1 ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass das Potenzial einer schnellen Ablenkung des Elektronenstrahls in Verbindung mit den untersuchten Energiedichten nur unzureichend nutzbar ist. Aus diesem Grund wurden für zusätzliche Versuche bei sämtlichen Scangeschwindigkeiten höhere Strahlleistungen verwendet. Die entsprechenden Parameterkombinationen wurden im Hinblick auf die Vermeidung der Fehlerbilder Schmelztropfenbildung und Schichtablösung ausschließlich experimentell evaluiert. Die Ergebnisse der Vorversuche, die mit *einer* Pulverschicht durchgeführt wurden (s. o.), zeigt das Prozessparameterfenster in Abbildung 62.

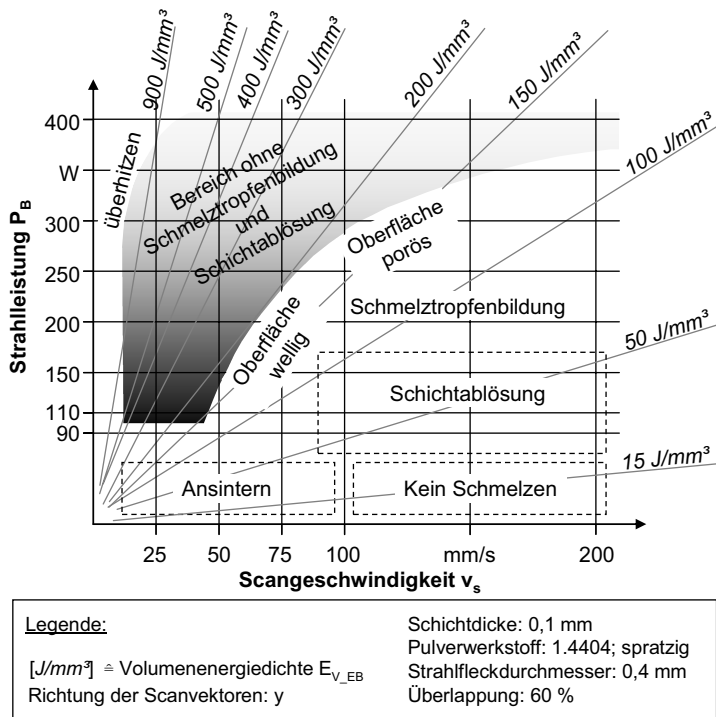


Abbildung 62: Prozessparameterfenster für das Elektronenstrahlschmelzen

Neben den auf der x- und y-Achse aufgetragenen Größen Scangeschwindigkeit v_s bzw. Strahlleistung P_B können obiger Abbildung 62 zusätzlich Linien konstanter Volumenenergiedichte

$$E_{V_EB} = \frac{P_B}{t_s \cdot h \cdot v_s} \quad (93)$$

entnommen werden. In der obigen Gleichung (93) bezeichnet t_s die Dicke der Pulverschicht und h den Hatch-Abstand (vgl. Unterabschnitt 3.4.2). Bei einem Vergleich dieser charakteristischen Größe mit den Versuchsergebnissen stellt sich heraus, dass bei Volumenenergiedichten im Bereich von $E_{V_EB} \approx 15 \text{ J/mm}^3$ der Werkstoff nicht aufschmilzt (vgl. Abbildung 62). Bei höheren Werten von E_{V_EB} resultiert im unteren Bereich der untersuchten v_s -Werte ein reines Ansintern der Pulverpartikel, d. h. die mittlere Temperatur des mit dem Strahl beaufschlagten Werkstoffs verbleibt unterhalb des Schmelzpunktes von $1430 \text{ }^\circ\text{C}$. Bei höheren Scangeschwindigkeiten und entsprechend größeren Strahlleistungen war Schichtablösung zu beobachten, d. h. es wurde nicht genügend Wärme zum Aufschmelzen der darunterliegenden Schicht eingebracht. Bei weiter ansteigenden Energiedichten bis zu $E_{V_EB} \approx 200 \text{ J/mm}^3$ war, außer bei höheren Scangeschwindigkeiten über ungefähr 100 mm/s , zunehmend Schmelztropfenbildung zu beobachten.

Der Übergang zwischen negativen Prozessergebnissen und dem in Graustufen hervorgehobenen Bereich ohne Schmelztropfen und Schichtablösen (vgl. Abbildung 62) ist ab $E_{V_EB} \approx 150 \text{ J/mm}^3$ durch das Auftreten von Unebenheiten des verfestigten Materials gekennzeichnet. Bei geringen Scangeschwindigkeiten ergaben sich dabei wellige Oberflächen, d. h. zusammenhängende längliche Schmelztropfen, die sich periodisch wiederholten. Mit steigender Scangeschwindigkeit wiesen die erzeugten Schichten eine zerklüftete Struktur, ähnlich der eines Netzes, auf. Stieg die Scangeschwindigkeit weiter an, so konnte das Pulver jedoch wiederum zu einer ebenen und gleichförmigen Schicht verfestigt werden. Der grau hervorgehobene Bereich (vgl. Abbildung 62) endet am linken Rand bei ca. 900 J/mm^3 . Für Parameterkombinationen darüber hinaus war ein Überhitzen, sowohl der Pulverschicht als auch der Grundplatte, zu beobachten. Dabei wurde zuviel Energie eingebracht, so dass der Werkstoff zunehmend verdampfte. Dies hatte zur Folge, dass sich nach dem Scannen zum einen kein Pulverwerkstoff mehr auf der Grundplatte befand und sich zum anderen sog. Tiefschweißeffekte einstellten, d. h. es entstand eine Verdampfungskapillare im beaufschlagten Material. Daraus resultierte in den meisten Fällen ein Loch in der Oberfläche der Grundplatte, wodurch die Fortführung des Baujobs verhindert wurde. Im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit konnten in den durchgeführten Vorversuchen mit Strahlleistungen über $P_B = 400 \text{ W}$, unabhängig von der eingestellten Scangeschwindigkeit, keine positiven Ergebnisse erzielt werden.

6.3.4 Herstellung von Probekörpern

Das in Unterabschnitt 6.3.3 vorgestellte Prozessfenster ist, wie oben beschrieben, das Resultat von Vorversuchen mit *einer* Pulverschicht. Mittels Elektronenstrahlschmelzen sollen jedoch dreidimensionale Körper durch die wiederholte Verfestigung einer Vielzahl von Schichten erzeugt werden. Daher wird im aktuellen Unterabschnitt evaluiert, inwieweit die gewonnen Erkenntnisse auf die Fertigung von räumlichen Geometrien anwendbar sind.

Die obigen Einsichtversuche wurden an Quadraten mit 10 mm Kantenlänge durchgeführt. Um eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse im Sinne der Fortführung in vertikaler Richtung sicherzustellen, diente als Probekörper konsequenter Weise ein Würfel derselben Kantenlänge. Mit der Auswahl dieser Evaluierungsgeometrie wurde gleichzeitig die Komplexität der Einflussgrößen gering gehalten, da ein Würfel einen konstanten Querschnitt sowie keine inneren Strukturen, d. h. Hohlräume, besitzt. Da die Geometrie zudem parallel zu einer Seitenfläche aufgebaut wurde, entfielen neben Überhängen auch Stützkonstruktionen.

Der Probekörper wurde mittels eines zufälligen, aus dem grau markierten Bereich nach Abbildung 62 bestimmten, Parametersatzes erstellt. Dafür kamen eine Strahlleistung von $P_B = 110 \text{ W}$ und eine Scangeschwindigkeit von $v_s = 40 \text{ mm/s}$ zur Anwendung. Nach Beendigung des Baujobs wurde die Oberfläche des Rohteils spanend nachbearbeitet und einer mikroskopischen Analyse zugeführt. Im Speziellen waren hierfür zwei parallele und senkrecht zur Grundplatte orientierte Flächen A und B relevant. Die Fläche A befindet sich im Randbereich und die Fläche B schneidet das Bauteil symmetrisch (vgl. Abbildung 63). Zusätzlich umfasste der zu mikroskopierende Körper einen Teil der Grundplatte, um die metallurgische Anbindung des Würfels zu untersuchen.

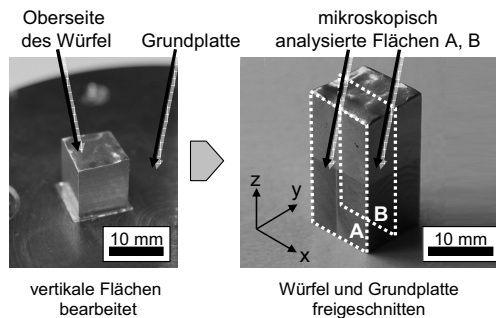


Abbildung 63: Vorbereitung des Probekörpers zur mikroskopischen Analyse

Bereits ohne optische Hilfsmittel ist erkennbar, dass bei dem erstellten Probekörper weder Schmelztropfenbildung noch Schichtablösung auftrat. Lediglich an der Oberseite sind geringfügige Unebenheiten zu erkennen (vgl. Abbildung 63 links). Als Mittelwert ergab sich bei einer Prüfung nach DIN ISO 3369 (1990) für den generativ erzeugten Abschnitt eine relative Dichte von $\rho_{\text{rel}} = 99,2\%$ bei einer Messungenauigkeit von $\pm 0,7\%$. Dieser Dichtewert errechnet sich nach der in Unterabschnitt 3.5.2 genannten Gl. (20).

Bei der mikroskopischen Analyse wurde der Prüfling in ein aushärtendes Trägerharz eingegossen und seine Oberfläche anschließend maschinell geschliffen und poliert. Mit Hilfe eines Auflicht-Stereomikroskopes konnten die Flächen A und B (vgl. Abbildung 63) ausgewertet werden. Die Aufnahmen in Abbildung 64 zeigen die Schliffbilder der beiden o. g. Flächen bei einfacher Vergrößerung.

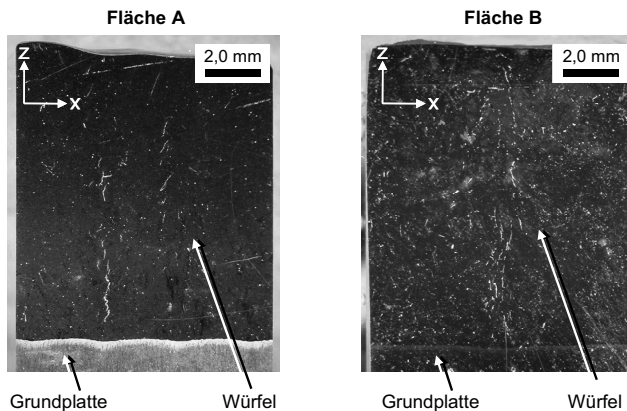


Abbildung 64: Mikroskopaufnahmen des Prüflings bei einfacher Vergrößerung

Beide Flächen umfassen sowohl einen Teilbereich der Grundplatte als auch den gesamten Querschnitt des generativ erstellten Würfels. Diese Bestandteile des Prüflings sind über die gesamte Breite des Ausschnitts vollständig miteinander verbunden. Der schichtweise Aufbau des oberen Bereichs konnte dem Schliffbild nicht entnommen werden und mit zunehmendem Abstand von der Grundplatte war keine Veränderung des Werkstoffverbundes zu erkennen. Auf der Oberseite des generativ gefertigten Materials traten überdies keine kugelförmigen Materialanhäufungen auf. Diese Analyse bestätigt damit die zuvor getroffene Aussage, dass der mittels Elektronenstrahlschmelzen hergestellte Probekörper aus 1.4404 frei von Schmelztropfen und Schichtablösung ist.

Der wie zuvor beschriebenen hergestellten Probekörper in Würfelform diente zur unmittelbaren Anwendung des Simulationsmodells durch die konsequente Fortführung der Vorversuche mit einzelnen Quadraten (vgl. Unterabschnitt 6.3.1). Damit konnte die Über-

einstimmung der Simulationsergebnisse mit einer einfachen Regelgeometrie nachgewiesen werden. Im Sinne der generativen Fertigung (vgl. Unterabschnitt 1.2) durch das Elektronenstrahlschmelzen sollen vor allem komplexe Werkstücke mit technischen Funktionen, wie z. B. Strukturbauteile, hergestellt werden. Damit ist es u. a. möglich, eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringer Masse zu erreichen. Um zu evaluieren, ob die ermittelten Erkenntnisse über Regelgeometrien hinaus anwendbar sind, wurden beispielhafte Strukturgeometrien aufgebaut (vgl. Abbildung 65).

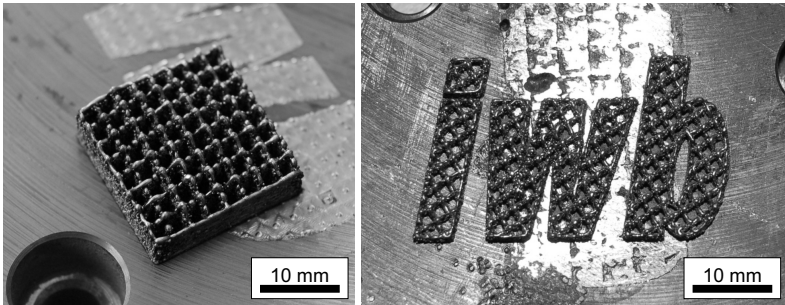


Abbildung 65: Mittels Elektronenstrahlschmelzen hergestellte Strukturgeometrien

Für die Erstellung dieser Probekörper wurden die Werte für die beiden, innerhalb dieser Arbeit untersuchten, primären Prozessparameter Scangeschwindigkeit und Strahlleistung exemplarisch zu $v_s = 100 \text{ mm/s}$ bzw. $P_B = 300 \text{ W}$ gewählt. Damit zeigte sich, dass das zuvor identifizierte Prozessparameterfenster (vgl. Abbildung 62) grundsätzlich auch zur Herstellung dieser Strukturgeometrien anwendbar ist.

6.4 Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

6.4.1 Vorgehen

Neben der reinen Verbreiterung des Prozessverständnisses soll mit dieser Arbeit eine technologische Weiterentwicklung des Elektronenstrahlschmelzens einhergehen. Um die industrielle Relevanz der gewonnenen Erkenntnisse überprüfen zu können, wird im Folgenden eine wirtschaftliche Abschätzung vorgenommen. Dementsprechend fasst der aktuelle Abschnitt zunächst die Erkenntnisse, die die monetären Aspekte bei der Bauteilfertigung beeinflussen, zusammen. Darauf folgend wird die Weiterentwicklung des Elektronenstrahlschmelzens sowohl mit bisherigen Ergebnissen im selben Bereich als auch mit dem Laserstrahlschmelzen verglichen. Abschließend ist dem Abschnitt 6.4 eine Abschätzung des wirtschaftlichen Verfahrenspotenzials bei der Verwendung neuar-

tiger Scanmuster sowie bei der Nutzbarmachung von flexiblen Steuerungsstrategien des Elektronenstrahls zu entnehmen.

Die Arbeiten von MEINDL (2005) und SIGL (2008) stellen heraus, dass die Wirtschaftlichkeit des Elektronenstrahlschmelzens vor allem von der Bearbeitungsdauer einer Schicht beeinflusst wird. Besonders SIGL (2008) betont, dass die Verringerung des entsprechenden Zeitbedarfs für die Fertigung zur Erhöhung der Marktakzeptanz von vorrangiger Bedeutung ist. In diesem Zusammenhang ist der wichtigste Fortschritt der vorliegenden Arbeit die Tatsache, dass das Pulver ohne Vorheizen verschmolzen werden kann, so dass der bis heute notwendige Vorheizschritt vor jeder Schichtverfestigung entfällt. Neben der erheblichen Bauzeitreduktion lässt sich hierdurch das nicht verfestigte Pulver mit geringerem Aufwand entfernen und zur Herstellung weiterer generativer Bauteile verwenden, da unnötige Versinterungen vermieden werden. Dieses Einsparpotenzial wird hauptsächlich durch eine spratzige Partikelform und durch die Anpassung des Strahlfleckdurchmessers während des Schmelzvorgangs ermöglicht (vgl. Unterabschnitt 6.2.2). Eine damit verbundene Reduktion der erzielbaren Oberflächenqualität ist gegenwärtig vernachlässigbar, da der überwiegende Anteil der generativ hergestellten Bauteile vor ihrem eigentlichen Einsatz einem Nachbearbeitungsverfahren zugeführt wird.

6.4.2 Annahmen für die Kostenrechnung

Als Grundlage zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit werden die Gesamtkosten zur generativen Bauteilherstellung K_{ges} herangezogen. Diese setzen sich nach ZÄH (2006) und VDI 3258 (1962) aus der Summe der Kosten für die Vor- und Nachbereitung der Anlage K_A , den Maschinenkosten K_{BM} , den Kosten für die Nachbearbeitung des Bauteils K_{NB} sowie den Materialkosten K_{MK} zusammen (vgl. Gl. (94)).

$$K_{ges} = K_A + K_{BM} + K_{NB} + K_{MK} \quad (94)$$

Zur Abschätzung der Herstellkosten mittels Elektronenstrahlschmelzen werden sowohl für den Unterabschnitt 6.4.3 als auch für den Unterabschnitt 6.4.4 die in Tabelle 11 aufgeführten Annahmen nach ZÄH (2006) verwendet.

Tabelle 11: Kostensätze für das Elektronenstrahlschmelzen nach ZÄH (2006)

Kostenkomponente	Maschinenstundensatz [€/h]	Stundensatz für Mitarbeiter [€/h]	Kosten für Pulverwerkstoff [€/kg]
K_A	$K_{MH} = 30,82$	$K_{M1} = 60,00$	-
K_{BM}	$K_{MH} = 30,82$	-	-
K_{NB}	-	$K_{M2} = 40,00$	-
K_{MK}	-	-	$K_p = 60,00$

Unter Berücksichtigung der Abschreibung und der kalkulatorischen Zinsen für die Anlageninvestition sowie der Raum-, der Energie- und der Instandhaltungskosten errechnet sich der Maschinenstundensatz einer marktüblichen Anlage zum Elektronenstrahlschmelzen nach VDI 3258 (1962) zu $K_{MH} = 30,82 \text{ €/h}$ (vgl. Anhang bzw. Tabelle 40). Für die im Folgenden betrachteten Bauteile aus Warmarbeitsstahl 1.2343 sowie Edelstahl 1.4404 beträgt der spezifische Kostensatz für Standard-Pulver zum Elektronenstrahlschmelzen ca. 60 €/kg (SIGL 2008). Zur vollständigen Abdeckung der generativen Prozesskette wird für die Vor- und Nachbereitung des Baujobs an der Anlage des Weiteren ein Mitarbeiter mit einem Stundensatz von $K_{M1} = 60,- \text{ €/h}$ angesetzt. Wie oben erwähnt, ist bei generativ gefertigten Bauteilen oftmals eine Nachbearbeitung der Oberflächen unerlässlich. Da in den meisten Fällen, abgesehen von Funktionsflächen, eine manuelle Nacharbeit der Bauteiloberfläche ausreicht, wird hierfür der Einsatz von Werkstattpersonal mit einem Stundensatz von $K_{M2} = 40,- \text{ €/h}$ veranschlagt.

6.4.3 Bewertung der technologischen Weiterentwicklung

Zunächst wird die wirtschaftliche Bedeutung der erzielten technologischen Weiterentwicklung mit bisherigen Ergebnissen innerhalb der elektronenstrahlbasierten Fertigung verglichen. Für diesen Schritt wird der in Abbildung 66 gezeigte Hohlzylinder nach SIGL (2008) herangezogen. Diese Regelgeometrie besitzt einen Innendurchmesser von 10,0 mm, einen Außendurchmesser von 30,0 mm und eine Höhe von 22,5 mm.

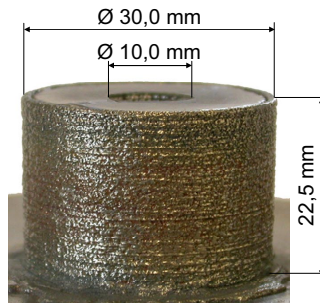


Abbildung 66: Versuchsbauteil Hohlzylinder nach SIGL (2008)

Von SIGL (2008) wurde obiges Versuchsbauteil auf dem gleichen Elektronenstrahldeemonstrator, wie er auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde, angefertigt. Allerdings wies die Anlagentechnik im Vergleich zum aktuellen System eine Klinge eines frühen Entwicklungsstands auf, wodurch die Genauigkeit beim Schichtauftrag wesentlich eingeschränkt war. Um die entstehenden Abweichungen der Schichthöhe zu reduzieren, wurde daher zur Herstellung des Hohlzylinders ein Wert von 0,2 mm gewählt. Zur Verfestigung des Pulvers wurde der Strahl in jeder Schicht spiralförmig von außen

nach innen über den kreisringförmigen Bauteilquerschnitt geführt. Der gesamte Prozessablauf ist in Abbildung 67 dargestellt.

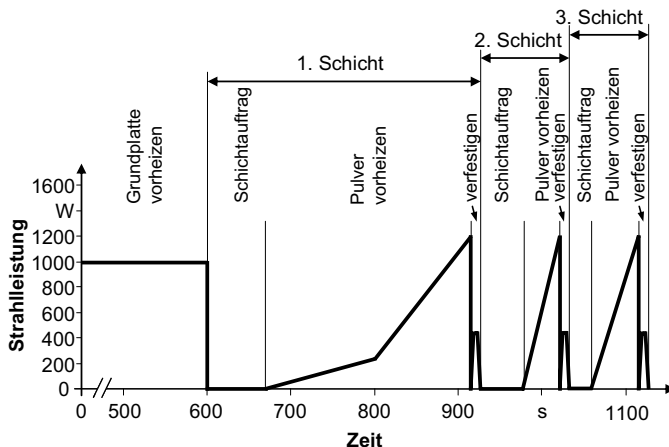


Abbildung 67: Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens nach SIGL (2008)

In Abbildung 67 fällt auf, dass der eigentlichen Schichtverfestigung ein Abschnitt zum Vorheizen der Grundplatte vorangestellt ist. Dies ist darin begründet, dass durch die Temperaturerhöhung eine verbesserte elektrische Leitfähigkeit zwischen Pulverschicht und Grundplatte erreicht wird und dadurch der Effekt des Pulververblasens reduziert werden kann (vgl. 2.2.3). Allerdings wird durch diesen Prozessschritt und die resultierende Plattentemperatur von ca. 1100 °C die Funktionsfähigkeit des verwendeten Systems zum Pulverauftrag erheblich eingeschränkt. Beispielsweise folgt aus der erhöhten Temperatur eine reduzierte Einsatzzeit der verwendeten Klinge. Überdies wirkt sich ein Verzicht auf die Funktion *Grundplatte vorheizen* vor allem positiv auf die notwendige Gesamtzeit des Prozesses aus. Des Weiteren fällt auf, dass sich der zeitliche Ablauf der beschriebenen drei Schichten voneinander unterscheidet. Besonders die erste Schicht weist eine ausgedehnte Aufheizkurve auf, womit eine elektrisch leitende Verbindung zur Grundplatte sowie ein geringfügiges Ansintern der einzelnen Pulverpartikel beabsichtigt war (SIGL 2008). Diesem 244 s dauernden Abschnitt schließt sich die Verfestigung der ersten Pulverschicht an. Die Prozessabfolge bei der Bearbeitung der zweiten und der dritten Schicht unterscheidet sich geringfügig voneinander. Die darauf folgenden Schichten wurden dann entsprechend der dritten Schicht bearbeitet, wozu eine Zeit von jeweils ca. 95 s benötigt wurde. In der Summe betrug die Bauzeit für das von SIGL (2008) hergestellte Versuchsbauteil aus 117 Schichten somit 3,32 h.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, optimierte Prozessablauf (vgl. Abbildung 68) weicht wesentlich von dem oben erläuterten ab. Es entfallen der 600 s lange Vorheiz-

schritt der Grundplatte sowie das vor jeder Verfestigung wiederkehrende Vorheizen der Pulverschicht. Dies ist insbesondere eine Folge angepasster Prozessparameter beim Scannen, wodurch das Pulververblasen bei Raumtemperatur eliminiert wird. Die Kreisringquerschnitte wurden entsprechend der Unterabschnitte 3.4.1 und 5.3.1 mit Quadraten der Kantenlänge 10 mm gefüllt. Der Hatch-Abstand der enthaltenen Scanvektoren betrug 0,16 mm. Bei einem Strahlfleckdurchmesser von 0,4 mm ergab sich damit, analog zu dem verwendeten Simulationsmodell, eine Strahlbahnüberlappung von 60 %.

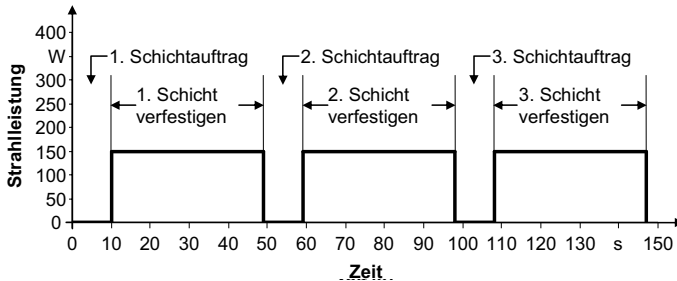


Abbildung 68: In der Arbeit entwickelter Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens

Um die erzielte Weiterentwicklung bewerten zu können, wurde von einer Scangeschwindigkeit von $v_s = 100 \text{ mm/s}$ ausgegangen und die für den generativen Bauprozess benötigte Dauer mit Hilfe der Maschinensoftware 9.4.X.X M2Adv der Firma Concept Laser GmbH berechnet. Darauf basierend betrug die Zeit zum Aufschmelzen jedes Querschnitts 39,3 s. Somit dauert die Schichtverfestigung für den Stand nach der Weiterentwicklung ca. 23 s länger als beim Referenzablauf nach SIGL (2008). Die Ursache ist in dem oben beschriebenen Scanmuster zu sehen. Die spiralförmige Ablenkung ist für kreisförmige Querschnitte optimiert, lässt sich jedoch nicht auf beliebige Geometrien übertragen. In der Summe ergab sich mit der im heutigen elektronenstrahlbasierten Prozess erreichbaren Auftragszeit des Pulvers von 10 s eine Gesamtdauer für die komplette Bearbeitung einer Schicht von 49,3 s. Dies entspricht annähernd 46 s weniger als im bisherigen Prozessablauf nach SIGL (2008).

Um die Weiterentwicklung des Elektronenstrahlschmelzens objektiv beurteilen zu können und die identischen Parameter wie bei den Simulationen und Versuchsreihen zu verwenden, wurde für den Bauprozess, im Gegensatz zur Vorgehensweise von SIGL (2008), eine Schichthöhe von 0,1 mm gewählt. Folglich bestand der betrachtete Hohlzylinder aus 225 Schichten und es ergab sich eine gesamte Bauzeit von 3,08 h mit den aktuellen Werten. Daraus resultierten mit den in Tabelle 11 aufgeführten Kostensätzen die folgenden Gesamtkosten (vgl. Tabelle 12):

Tabelle 12: Gegenüberstellung der Herstellkosten des Hohlzylinders mittels Elektronenstrahlschmelzen nach SIGL (2008) mit den Herstellkosten nach aktuellem Stand

Kostenkomponente	SIGL (2008)		aktueller Stand	
	Zeit [h]	Kosten [€]	Zeit [h]	Kosten [€]
K_A	1	90,82	1	90,82
K_{BM}	3,32	102,40	3,08	94,92
K_{NB}	3	120,00	1	40,00
K_{MK}	-	6,66	-	6,66
K_{ges}	-	319,88	-	232,40

Zur Vor- und Nachbereitung der Elektronenstrahlanlage benötigt ein Mitarbeiter ca. eine Stunde. Da das Fertigungssystem währenddessen belegt ist, muss in dieser Zeitspanne der Maschinenstundensatz in Höhe von 30,82 €/h berücksichtigt werden. Für die Nacharbeit des Hohlzylinders wird eine Dauer von 3 Stunden und für das Bauteil nach aktuellem Stand 1 Stunde angesetzt, da durch die halbe Schichthöhe von einer deutlich reduzierten Oberflächenrauheit auszugehen ist. Der Entfall des Vorheizschrittes führt überdies dazu, dass Anhaftungen durch teilversintertes Pulver an den Grenzflächen des Bauteils weitgehend vermieden werden. Aufgrund der identischen Werkstückgeometrie des Hohlzylinders wird sowohl nach SIGL (2008) als auch nach dem aktuellen Stand von identischen Pulverkosten in Höhe von 6,66 € ausgegangen (vgl. Tabelle 12).

In der Summe betragen die Gesamtkosten für den Hohlzylinder nach SIGL (2008) 319,88 €. Würde die gleiche Geometrie unter Verwendung von Prozesseinstellungen nach aktuellem Stand gebaut, resultierten Gesamtkosten von 232,40 €. Dies entspricht in etwa einer Ersparnis in Höhe von 27 %. Die genannten absoluten Beträge erscheinen für das betrachtete Bauteil hoch. Es gilt jedoch zu bedenken, dass der zur Verfügung stehende Bauraum bei industriellen Anwendungen deutlich effizienter genutzt werden kann. Der Aufwand zur Vor- und Nachbereitung der Anlage K_A ist die zweitgrößte Kostenkomponente (vgl. in Tabelle 12 rechts). Werden mehrere Bauteile gefertigt, bleibt dieser Betrag nahezu identisch und kann auf eine größere Stückzahl umgelegt werden.

6.4.4 Bewertung im Vergleich zum Laserstrahlschmelzen

Wie bereits in Unterabschnitt 1.2.3 diskutiert, weist das Elektronenstrahlschmelzen hinsichtlich des Funktionsprinzips vor allem mit dem Laserstrahlschmelzen Gemeinsamkeiten auf. Allerdings verfügt letztgenanntes Verfahren aufgrund der längeren Entwicklungshistorie über einen höheren Reifegrad, der sich u. a. in einer umfassenderen Markverbreitung widerspiegelt. Vor diesem Hintergrund ist über Unterabschnitt 6.4.3 hinaus

ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen EB- und Laserverfahren von besonderem Interesse. Die diesbezügliche Untersuchung wird anhand des in Abbildung 69 illustrierten Bauteils, eines sog. Misch- und Schereinsatzes für Spritzgießwerkzeuge, durchgeführt.

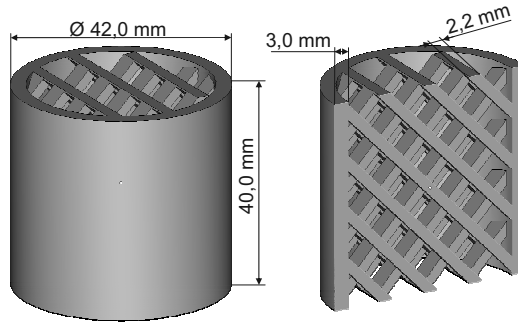


Abbildung 69: 3D-CAD-Ansicht des Misch- und Schereinsatzes für Spritzgießwerkzeuge

Dieses Bauteil verfügt im Inneren über verschränkt zueinander angeordnete Streben, die zu einer gezielten Verengung des Strömungsquerschnitts führen. Der Misch- und Schereinsatz wird beim Spritzgießen verwendet und übernimmt die Aufgabe, die eingebrachte Kunststoffschmelze zu durchmischen, bevor sie in den Heißkanal eindringt. Die raue Oberfläche des Werkstücks fördert die Reibung im Fluid, wodurch die Temperatur der Schmelze zusätzlich erhöht wird. Die Auswahl des Werkstoffs des o. g. Bauteils ist u. a. vom zu verspritzenden Material abhängig. Um die in dieser Arbeit entwickelten Ergebnisse bewerten zu können, wird von Edelstahl 1.4404, der sowohl im elektronen- wie im laserstrahlbasierten generativen Verfahren verarbeitet werden kann, ausgegangen.

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Elektronenstrahlschmelzens kommen die in Unterabschnitt 6.4.1 aufgeführten Kostensätze zur Anwendung. Für das Laserstrahlschmelzen wird ein Maschinenstundensatz von 22,51 € während der Anlagenvor- und Nachbereitung bzw. von 23,41 € während des Bauprozesses angesetzt. Der Unterschied kommt durch die Verwendung von Stickstoff als Schutzgas zustande, dessen Verbrauch mit durchschnittlich 3 m³/h abgeschätzt wird und nur bei der Fertigung relevant ist. Eine detaillierte Berechnung der Maschinenstundensätze für die elektronenstrahl- sowie die laserstrahlbasierte Fertigung kann dem Anhang (vgl. Tabelle 40) entnommen werden.

Tabelle 13: Kostensätze und Annahmen für das Laserstrahlschmelzen nach ZÄH (2006)

Kostenkomponente	Maschinenstundensatz [€/h]	Stundensatz für Mitarbeiter [€/h]	Kosten für Pulverwerkstoff [€/kg]
K_A	$K_{MH} = 22,51$	$K_{M1} = 60,00$	-
K_{BM}	$K_{MH} = 23,41$	-	-
K_{NB}	-	$K_{M2} = 40,00$	-
K_{MK}	-	-	$K_P = 145,00$

Die spezifischen Personalkosten sind mit den in Tabelle 11 aufgezeigten Sätzen für das Elektronenstrahlschmelzen identisch. Dies bezieht sich sowohl auf die Tätigkeiten zur Vor- und Nachbereitung der Anlage K_A als auch zur manuellen Nachbearbeitung des Bauteils K_{NB} . Die marktüblichen Kosten für den Pulverwerkstoff aus 1.4404 betragen nach Auskunft der Firma Concept Laser GmbH 145,- €/kg. Auch für den Misch- und Schereinsatz wurden die Bauzeiten mit Hilfe der o. g. Maschinensoftware berechnet. Für das Laserstrahlschmelzen kamen aktuelle Prozesseinstellungen zum Einsatz, die als Standard im Programm hinterlegt sind. Da eine hohe Oberflächengüte aufgrund des Anwendungsfalls nicht im Vordergrund stand, wurde bei beiden Verfahren eine Schichthöhe von 0,1 mm gewählt. Somit berücksichtigt diese Abschätzung sowie das in der vorliegenden Arbeit erstellte Simulationsmodell dieselben Werte.

Für die Fertigung des beschriebenen Bauteils mittels Laserstrahlschmelzen wird eine Zeit von ca. 3,54 Stunden benötigt. Im generativen Verfahren auf Elektronenstrahlbasis beträgt die Zeit für das gleiche Werkstück unter Verwendung der aktuellen Prozessparameter (vgl. Unterabschnitt 6.4.3) ungefähr 5,54 Stunden. Dadurch entstehen Maschinenkosten in Höhe von 82,89 € bzw. 170,81 €. Aufgrund des vergleichbaren Funktionsprinzips ist zur Vor- und Nachbereitung des Baujobs bei beiden Anlagen von der identischen Arbeitszeit auszugehen. Wird hierfür jeweils eine Stunde angesetzt, so ergibt sich $K_A = 82,51$ € (Laserstrahlschmelzen) sowie $K_A = 90,82$ € (Elektronenstrahlschmelzen). Die Kosten für das Werkstattpersonal zur Nacharbeit betragen in beiden Fällen 80,- €, da wegen der identischen Schichthöhen im Bauprozess mit einem vergleichbaren Aufwand kalkuliert werden kann. Als letzte Komponente müssen die Materialkosten zu den Gesamtkosten addiert werden. Mit den gegenüber gestellten Verfahren wird dasselbe Volumen an Pulver verarbeitet. Die unterschiedlichen Kilopreise führen zu Materialkosten in Höhe von 29,98 € für das Laserstrahlschmelzen und von 12,41 € für das Elektronenstrahlschmelzen.

Im direkten Vergleich stehen 275,38 € für die laserstrahlbasierte Fertigung Gesamtkosten von 354,04 € für das Elektronenstrahlschmelzen gegenüber (vgl. Abbildung 70).

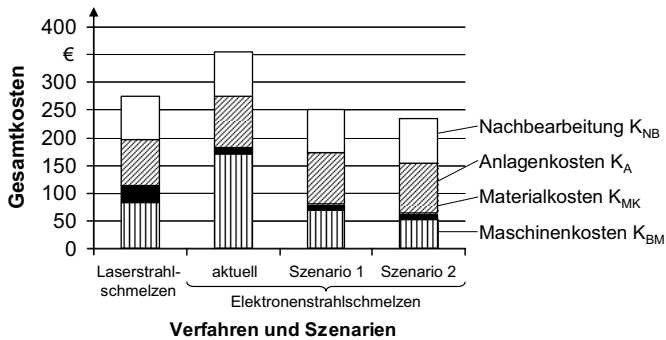


Abbildung 70: Gegenüberstellung der Gesamtkosten für die Herstellung des Misch- und Schereinsatzes mittels Strahlschmelzen

Wie bereits erläutert, ist die mit Elektronenstrahlgeneratoren realisierbare maximale Ablenkfrequenz deutlich größer als bei Laseranwendungen. Wie im Verlauf der Arbeit gezeigt wurde, kann die damit verbundene hohe Scangeschwindigkeit nicht per se zur Realisierung einer geringen Bauzeit genutzt werden, wenn das hier untersuchte Standard-Scanmuster (vgl. Abbildung 34) zum Einsatz kommt. Vielmehr existieren physikalische Grenzen, die eine an die elektronenstrahlbasierte Fertigung adaptierte Weiterentwicklung, wie beispielsweise neuartige Scanmuster, notwendig machen. Neben geänderten Hatch-Abständen, anderen Orientierungen der Scanvektoren sowie weiteren Grundmustergeometrien zur Ablenkung eines punktförmigen Auftreffbereichs ist u. a. denkbar, dass quasi-konstante Linien oder Flächen durch die schnelle Ablenkung generiert und zur Verfestigung über die Pulverschicht geführt werden.

Alternativ eröffnet sich mit der Mehrstrahltechnik eine weitere Strategie zum optimierten Aufschmelzen. Wie bereits in Unterabschnitt 1.4.1 ausgeführt, kann der Elektronenstrahlgenerator hierbei dazu verwendet werden, um durch eine hochfrequente Ablenkung gewissermaßen zeitgleich mehrere, örtlich getrennte Strahlflecken zu erzeugen (ZENKER 2003) und unter Beibehaltung des untersuchten Scanmusters zur selektiven Verfestigung der Pulverschicht zu nutzen. Diese Möglichkeit wird in der vorliegenden Arbeit nicht explizit zur Bauteilfertigung umgesetzt. Jedoch zeigen erste, vom Autor durchgeführte Machbarkeitsversuche, dass vier bzw. acht quasi-parallele Strahlauftreffbereiche durch angepasste Figurdateien realisiert und zur Beaufschlagung der Pulverschicht in der Form benachbarter Grundmusterquadrate genutzt werden können.

Um das Entwicklungspotenzial des Elektronenstrahlschmelzens zur wirtschaftlichen Fertigung abschätzbar zu machen, werden in Abbildung 70 zusätzlich zwei Szenarien betrachtet. Das Szenario 1 umfasst die Prämisse, dass vier Teilstrahlen für die Schichtverfestigung genutzt werden und damit eine Verkürzung der Scanzeit von 75 % erzielt

wird. Dementsprechend beschreibt Szenario 2 die Erzeugung von acht Teilstrahlen und analog die Reduktion der Verfestigungsdauer um den Faktor acht. Da die für den Schichtauftrag benötigte Zeit von dieser Optimierungsmaßnahme unbeeinflusst bleibt, verkürzt sich die Dauer für die Herstellung der Bauteile nicht im gleichen Maße. Unter der Voraussetzung, dass die Kostenkomponenten K_A , K_{NB} und K_{MK} konstant bleiben, folgen für Szenario 1 Gesamtkosten in Höhe von 252 € und für Szenario 2 beträgt $K_{ges} = 235$ € (vgl. Abbildung 70). Mit den genannten Beträgen gehen, bezogen auf die Fertigung durch Laserstrahlschmelzen, Einsparungen in Höhe von 8,5 % bzw. von ca. 14,7 % einher. Dies zeigt die mögliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei der Fertigung mittels Elektronenstrahl, die durch die Entwicklung neuer Scanstrategien erzielt werden kann.

Mit diesen Betrachtungen führt das Kapitel 6 den Nachweis der Praxisrelevanz der im Verlauf der Arbeit gewonnen Erkenntnisse. Zunächst standen technologische Aspekte im Vordergrund. Dabei wurden den bislang qualitativ vorliegenden Erkenntnissen zum analytischen Prozessmodell des Pulververblasens reale Einstellungen für Prozesskenngrößen zugewiesen. Damit ist es nunmehr möglich, beim Elektronenstrahlschmelzen auf den bisher notwendigen Vorheizschritt zu verzichten und die zur Bearbeitung einer Schicht benötigte Zeitspanne wesentlich zu reduzieren. Im Sinne einer ganzheitlichen Integration aller Ergebnisse wurden zur Bauteilerstellung die zuvor gewonnenen Erkenntnisse für die Pulververarbeitung bei Raumtemperatur herangezogen. Die exakten Werte für die Scangeschwindigkeit und die Strahlleistung folgen aus der konsequenten Anwendung der Ergebnisse der Simulation, wodurch die Gültigkeit selbiger nachgewiesen wurde. In der Folge ist die Herstellung einer Regelgeometrie sowie von einfachen Strukturbauteilen möglich. Als Abschluss des Kapitels wurde die wirtschaftliche Relevanz abgeschätzt. Dabei zeigte sich erstens die ökonomische Bedeutung der Weiterentwicklung des Elektronenstrahlschmelzens im Vergleich zu bisherigen Arbeiten. Zweitens belegen die berechneten Herstellkosten, dass durch die Entwicklung neuer Scanstrategien, u. a. auf Basis der hochfrequenten Strahlablenkung, ein wirtschaftlicher Vorteil im Vergleich zu bereits etablierten laserstrahlbasierten Schichtbauverfahren erreicht werden kann.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund eines sich verschärfenden globalen Wettbewerbs gewinnt *Mass Customization*, d. h. die vollständig kundenorientierte Herstellung und Vermarktung individueller Produkte, zunehmend an Bedeutung (REICHWALD & PILLER 2006; ZÄH 2006). In diesem Kontext können insbesondere die generativen Fertigungsverfahren des Strahlschmelzens dem wachsenden Bedarf an komplexen und hochwertigen Endkundenprodukten sowie Komponenten von Endkundenprodukten erfolgreich begegnen. Dabei kommt vermehrt das Elektronenstrahlschmelzen zum Einsatz. Vor allem aufgrund der großen Energiedichten und der hochfrequenten Strahlablenkung wird dem Verfahren ein umfangreiches Potenzial zur wirtschaftlichen Fertigung qualitativ hochwertiger Metallbauteile zugeschrieben. Im Vergleich zum Laserstrahlschmelzen, welches ein vergleichbares Funktionsprinzip aufweist, hat die generative Fertigung auf Elektronenstrahlbasis gegenwärtig noch einen geringeren Reifegrad.

Das wesentliche Hemmnis für eine breite industrielle Anwendung stellt gegenwärtig die unzureichende Prozessbeherrschung dar. Um dreidimensionale Geometrien prozesssicher herstellen zu können, mussten vorrangig die Fehlerbilder *Pulververblasen*, *Schmelztropfenbildung* und *Schichtablösung* geklärt und eliminiert werden. Es bedurfte daher einer detaillierten Untersuchung der Energieeinkopplung in die Pulverschicht sowie der thermischen Abläufe in der Prozesszone während der Pulververfestigung.

Die Basis für die vorliegende Arbeit bildet die Analyse von Verfahrensgrundlagen sowie die Betrachtung von bisherigen Erkenntnissen hinsichtlich der o. g. Fehlerbilder im selben sowie im vergleichbaren Bereich des Laserstrahlschmelzens. Dadurch konnten Erkenntnisse im Hinblick auf die Schmelztropfenbildung bzw. die Schichtablösung analysiert und für die weiteren Untersuchungen nutzbar gemacht werden. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Art und Ursachen der zu eliminierenden Fehlerbilder folgte der Entwurf einer umfassenden Methode zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Die entwickelte Vorgehensweise sah zunächst eine Prozessanalyse nach Methoden der Systemtheorie vor. Neben der Erstellung eines Ablaufdiagramms, welches die Verknüpfung des Stoff-, Energie- und Informationsflusses wiedergibt, und einer konsequenten Fokussierung auf den zentralen Aspekt der selektiven Pulververfestigung, konnte damit eine signifikante Reduktion der Anzahl der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren auf den Prozessverlauf bzw. auf das Ergebnis des Elektronenstrahlschmelzens erzielt werden. Dabei wurden durch die Analyse des Standes der Erkenntnisse relevante Faktoren bestimmt bzw. irrelevante von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Ziel der anschließenden Prozessmodellierung war es, die ablaufenden Vorgänge mathematisch zu beschreiben, um die Effekte während des Pulververblasens und des Pulveraufschmelzens zu verstehen sowie beeinflussende Faktoren identifizieren zu können. Im Fall des Pulververblasens konnten qualitative Aussagen unmittelbar aus dem analytischen Prozessmodell gewonnen werden. Für das Aufschmelzverhalten des Pulvers ist das bei der Einkopplung der Strahlenergie entstehende instationäre Temperaturfeld ursächlich. Letztgenanntes wird durch eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung beschrieben und ist für den untersuchten Fall mit temperaturabhängigen Materialkennwerten und komplexen Randbedingungen analytisch nicht lösbar. Aus diesem Grund wurde das erstellte Gleichungssystem in eine FEM-gestützte Simulationsumgebung implementiert und seine Gültigkeit mit Hilfe von Temperaturmessungen überprüft. Dies war notwendig, da der reale Prozess hinsichtlich der sich ergebenden Schmelzbadaabmessungen nicht adäquat beobachtet werden kann. Durch die Simulation gelang es hingegen, die Auswirkungen verschiedener Prozessparametereinstellungen auf die Temperaturverteilung zu untersuchen.

Auf der Basis von Prozessanalysen und Literaturquellen konnten damit den als primär relevant definierten Einflussgrößen *Strahlleistung* und *Scangeschwindigkeit* Wertebereiche zugeordnet werden, bei deren Einhaltung die unerwünschten Prozessdefizite nicht auftreten. Mit diesen Parametersätzen war es in der Folge möglich, Probekörper und Strukturgeometrien mittels Elektronenstrahlschmelzen herzustellen. Dafür wurden zusätzlich die Erkenntnisse zum Pulververblasen, insbesondere die Möglichkeit zur Pulververfestigung bei Raumtemperatur, berücksichtigt. Der Entfall des Vorheizschritts zur Vermeidung des Pulververblasens sowie die Möglichkeit der Herstellung filigraner Bauteile ohne Schmelztropfenbildung und Schichtablösung bedeutet eine erhebliche Weiterentwicklung des betrachteten Fertigungsverfahrens.

Die gewonnenen Erkenntnisse ließen sich abschließend unter monetären Gesichtspunkten bewerten. Dabei wurde ersichtlich, welche Bedeutung vor allem der Reduktion des zur Pulververfestigung benötigten Zeitanteils zukommt, um Bauteile wirtschaftlich herzustellen. In diesem Zusammenhang stellte sich heraus, dass neuartige Scanstrategien, beispielsweise durch die Mehrstrahltechnik zur Erzeugung mehrerer zeitparalleler Schmelzbäder, zu signifikanten Einsparungen führen können.

7.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet durch die mathematische Modellierung, die numerische Lösung der beschreibenden Differentialgleichungen sowie die versuchsbasierte Umsetzung der Erkenntnisse exemplarisch für den Werkstoff 1.4404 einen Beitrag zur Pro-

zessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Gleichwohl bildet sie mit Sicherheit nicht den Abschluss aller Arbeiten auf diesem Gebiet.

Neben dem Pulververblasen, der Schmelztropfenbildung und der Schichtablösung, die durch die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze vermieden werden konnten, existieren noch weitere Defizite im Hinblick auf den Einsatz als Serienfertigungsverfahren. Hierunter fallen u. a. Materialanhäufungen, Unregelmäßigkeiten im Gefügeaufbau, Bauteilverzug, Eigenspannungen, anisotrope Festigkeiten sowie ungenügende Oberflächengüten. Die Prozessmodellierung und -simulation kann diesbezüglich einen wesentlichen Beitrag leisten, wofür der vorgestellte Ansatz die Grundlage bildet.

In Bezug auf die Simulation des Elektronenstrahlschmelzens muss zukünftig die Möglichkeit zur Auswertung unterschiedlicher Scanstrategien gegeben sein, um besonders wirtschaftliche Prozessparametereinstellungen zur Fertigung beliebiger Bauteilgeometrien bestimmen zu können. Darüber hinaus besteht der Bedarf an einer Weiterentwicklung neuartiger Scanmuster. Die Vergrößerung des Geometriemodells zur Analyse von Pulverschichten oder ganzer Werkstücke mit dem vorgestellten Detaillierungsgrad macht jedoch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Rechnerkapazitäten erforderlich. Alternativ besteht auch die Möglichkeit, den Umfang des simulierten Prozessmodells zu reduzieren, indem weniger komplexe, d. h. abstrahierte Wärmequellenmodelle und Materialdefinitionen zur Anwendung kommen. Inwieweit der damit einhergehende Genauigkeitsverlust akzeptabel ist, hängt nicht zuletzt von dem untersuchten Modellierungszweck ab.

Zusammenfassend sollte der Fokus zukünftiger Arbeiten darauf liegen, die wirtschaftliche Serienfertigung von kundenindividuellen Produkten im Sinne von *Mass Customization* zunehmend umzusetzen. Durch die Schaffung eines grundlegenden Prozessverständnisses einerseits und die Bereitstellung eines erweiterbaren Modells zur Prozesssimulation des Elektronenstrahlschmelzens andererseits legt die vorliegende Arbeit den Grundstein für diese Entwicklungen.

Literaturverzeichnis

ARDENNE 1962

Ardenne, M. v.: Tabellen zur angewandten Physik: Elektronenphysik, Ionenphysik, Vakuumphysik, Kernphysik, medizinische Elektronik, Hilfsgebiete. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften 1962.

BAEHR & STEPHAN 1998

Baehr, H. D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin: Springer 1998. ISBN: 3-54064-458-X.

BANERJEE et al. 2007

Banerjee, A.; Raju, S.; Divakar, R.; Mohandas, E.: High Temperature Heat Capacity of Alloy D9 Using Drop Calorimetry Based Enthalpy Increment Measurement. International Journal of Thermophysics 28 (2007) 1, S. 97-108.

BATHE 1986

Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden. Berlin: Springer 1986. ISBN: 3-54015-602-X.

BAUER & SCHLÜNDER 1978

Bauer, R.; Schlünder, E.-U.: Effective radial thermal conductivity of packings in gas flow. Part II: Thermal conductivity of the packing fraction without gas flow. International Chemical Engineering 18 (1978) 2, S. 189-204.

BAUMBERGER 2007

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

BERTALANFFY 1969

Bertalanffy, L. v.: General System Theory. Foundations, Development, Applications. New York City, New York, USA: George Braziller 1969. ISBN: 0-80760-453-4.

BIRKHOFF 1958

Birkhoff, R. D.: The passage of fast electrons through matter. In: Flügge, S. (Hrsg.): Handbuch der Physik. 2. Aufl. Berlin: Springer 1958, S. 128-131.

BLANKE 1989

Blanke, W.: Thermophysikalische Stoffgrößen. Berlin: Springer 1989. ISBN: 3-54018-495-3.

BÖHM 1999

Böhm, S.: Modellierung und Simulation des Elektronenstrahl-Schweißprozesses unter Berücksichtigung der Elektronenreflexion und der Elektronenstreuung. Diss. RWTH Aachen (1999). Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-82657-207-6.

BÖHMER 1997

Böhmer, R.: Methodik computergestützter Prozeßmodellierung. München: Oldenbourg 1997. ISBN: 3-48624-172-9.

BRAESS 2007

Braess, D.: Finite Elemente - Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie. 4., überarbeitete und erweiterte Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 3-54072-449-4.

BRONSTEIN et al. 2000

Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: Taschenbuch der Mathematik. 5., überarbeitete und erweiterte Aufl. Frankfurt am Main: Harri Deutsch 2000. ISBN: 3-81712-015-X.

CAPUS 2000

Capus, J. M.: Metal Powders: A Global Survey of Production, Applications and Markets. 3. Aufl. Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology 2000. ISBN: 1-85617-3712.

CHRISTENHUSZ & REINER 1967

Christenhusz, R.; Reiner, L.: Schichtdickenabhängigkeit der Wärmezeugung durch Elektronenstrahlung im Energiebereich zwischen 9-100 keV. Zeitschrift für angewandte Physik 23 (1967) o. Nr., S. 397-404.

COMSOL AB 2007

COMSOL AB (Hrsg.): COMSOL Multiphysics User's Guide. Stockholm, Schweden: Oktober 2007.

CRAWFORD 1962

Crawford, C. K.: Electron Beam Machining: Introduction to Electron Beam Technology. New York City, New York, USA: John Wiley & Sons 1962.

CUTNELL & JOHNSON 2009

Cutnell, J.; Johnson, K. W.: Physics, Chapters 1-17. 8. Aufl. New York City, New York, USA: John Wiley & Sons 2006. ISBN: 0-47039-530-3.

DAENZER & BÜCHEL 2002

Daenzer, W. F.; Büchel, A. (Hrsg.): Systems Engineering. 11., Aufl. Zürich, Schweiz: Orell Füssli 2002. ISBN: 3-85743-998-X.

DAVIS et al. 2009

Davis, J.; Bontha, S.; Klingbeil, N.: Effect of Free-Edges on Melt Pool Geometry and Solidification Microstructure in Beam-Based Fabrication of Thin-Wall Structures. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 20. Austin (USA), 3.-5. August 2009. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2009, S. 320-331.

DAVIS 2004

Davis, T. A.: Algorithm 832: UMFPACK, an unsymmetric-pattern multifrontal method. ACM Transactions on Mathematical Software 30 (2004) 2, S. 196-199.

DIN 32511 2005

DIN 32511 (Entwurf): Schweißen. Elektronenstrahlverfahren zur Materialbearbeitung. Begriffe für Prozesse und Geräte. Berlin: Beuth 2005.

DIN 55350 1993

DIN 55350: Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik. Berlin: Beuth 1993.

DIN EN 60584 1996

DIN EN 60584: Thermopaare - Teil 1: Grundwerte der Thermospannungen. Berlin: Beuth 1996.

DIN ISO 3369 1990

DIN ISO 3369: Undurchlässige Sintermetalle und Hartmetalle. Ermittlung der Dichte. Berlin: Beuth 1990.

DOBENECK & LÖWER 2004

Dobeneck, D. v.; Löwer, T.: Elektronenstrahlschweißen - Derzeitiger Stand und Entwicklungstendenzen. In: Große Schweißtechnische Tagung (GST 2004). Magdeburg, 22.-24. September 2004. Düsseldorf: DVS 2004. ISBN: 3-87155-689-0.

DOBENECK et al. 2002

Dobeneck, D. v.; Löwer, T.; Mehnhard, C.: Entwicklungspotenziale der thermischen Materialbearbeitung mit Elektronenstrahlen im Vergleich zu Laserstrahlen. Bremen: BIAS-Verlag 2002.

DVS 3209 1995

DVS 3209: Wirkungsgrade beim Elektronenstrahl- und Laserstrahlschweißen. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1995.

EGELN 2007

Egeln, J. (Hrsg.): Bericht zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Öffentlichkeitsarbeit 2007.

EICHGRÜN 2003

Eichgrün, K.: Prozesssicherheit in fertigungstechnischen Prozessketten - Systemanalyse, ganzheitliche Gestaltung und Führung. Diss. Universität Kaiserslautern (2003). (Produktionstechnische Berichte 46).

ESCHEY et al. 2009

Eschey, C.; Lutzmann, S.; Zaeh, M. F.: Examination of the powder spreading effect in Electron Beam Melting (EBM). In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 20. Austin, Texas, USA, 3.-5. August 2009. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2009, S. 308-319.

EUSTATHOPOULOS et al. 1999

Eustathopoulos, N.; Nicholas, M. G.; Drevet, B.: Wettability at High Temperatures. 2. Aufl. Oxford, UK: Pergamon 1999. ISBN: 0-08042-146-6.

FLEGEL et al. 2004

Flegel, G.; Birnstiel, K.; Nerreter, W.: Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik. 8., vollständig neubearbeitete Aufl. München: Hanser 2004. ISBN: 3-44622-858-6.

GEHRKE et al. 2008

Gehrke, B.; Legler, H.; Leidmann, M.: Forschungs- und wissensintensive Wirtschaftszweige in Deutschland: Produktion, Wertschöpfung, Beschäftigung und Qualifikationserfordernisse. Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) 2008. ISSN: 1613-4338. (Studien zum deutschen Innovationssystem 9-2008).

GERMAN 1996

German, R. M.: Sintering Theory and Practice. New York City, New York, USA: John Wiley & Sons 1996. ISBN: 0-47105-786-X.

GRIGORIEV & MEILIKHOV 1996

Grigoriev, I. S.; Meilikhov, E. Z. (Hrsg.): Handbook of Physical Quantities. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press 1996. ISBN: 0-84932-861-6.

GROTH & MÜLLER 2000

Groth, C.; Müller, G.: FEM für Praktiker. Temperaturfelder. 2., völlig neu bearbeitete Aufl. Renningen: Expert 2001. ISBN: 3-81691-668-6. (FEM für Praktiker Band 3).

GROTH & MÜLLER 2007

Groth, C.; Müller, G.: FEM für Praktiker. Grundlagen. 8., neu bearbeitete Aufl. Renningen: Expert 2007. ISBN: 3-81692-685-1. (FEM für Praktiker Band 1).

GUSAROV et al. 2007

Gusarov, A.; Yadroitsev, I.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. Applied Surface Science 254 (2007) 2, S. 975-979.

HAUSER et al. 2004

Hauser, C.; Childs, T. H. C.; Badrossamay, M.: Further developments in process mapping and modelling in direct metal selective laser melting. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 15. Austin, Texas, USA, 2.-4. August 2004. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2004, S. 448-459.

HAUSER et al. 2005

Hauser, C.; Sutcliffe, C.; Egan, M.; Fox, P.: Spiral growth manufacturing (SGM) - A continuous additive manufacturing technology for processing metal powder by selective laser melting. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 16. Austin, Texas, USA, 1.-3. August 2005. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2005, S. 1-12.

HERMAN 1981

Herman, H.: Treatise on Materials Science and Technology. New York City, New York, USA: Academic Press 1981. ISBN: 0-12341-820-8.

HERMANN 2006

Hermann, M.: Numerische Mathematik. 2., überarbeitete und erweiterte Aufl. München: Oldenbourg 2006. ISBN: 3-48657-935-5.

HERWIG 2000

Herwig, H.: Wärmeübertragung A-Z. 1. Aufl. Berlin: Springer 2000. ISBN: 3-54066-852-7.

HERZOG 2002

Herzog, F.: Lasercusing - Eine generative Technologie zur Herstellung von Metallbauteilen. In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Rapid Technologien - Anspruch, Realität, Zukunft. Augsburg, 11. Juli 2002. München: Utz 2002, S. 4-14-15. (*iwb* Seminarberichte 62).

HORNFECK 2008

Hornfeck, T.: Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie. Diss. TU München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 3-83160-826-1. (*iwb* Forschungsberichte 221).

INOYA et al. 1991

Iinoya, K.; Gotoh, K.; Higashitani, K.: Powder Technology Handbook. New York City, New York, USA: Marcel Dekker 1991. ISBN: 0-82478-329-8.

KAHNERT et al. 2007

Kahnert, M.; Lutzmann, S.; Zaeh, M. F.: Layer Formations in Electron Beam Sintering. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 18. Austin, Texas, USA, 6.-8. August 2007. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2007, S. 88-99.

KLEIN 1997

Klein, B.: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode. 2., neubearbeitete Aufl. Braunschweig: Vieweg 1997. ISBN: 3-52815-125-0.

KLEIN 1962

Klein, W.: Positive Temperaturkoeffizienten und das Problem der Sättigung der Lumineszenz von ZnS-Einkristallen bei Anregung mit Elektronenstrahlen. Diss. Freie Universität Berlin (1962).

KLEPPMANN 2009

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 6., überarbeitete Aufl. München: Hanser 2009. ISBN: 3-44642-033-9.

KLOCKE & WAGNER 2003

Klocke, F.; Wagner, C.: Coalescence behaviour of two metallic particles as base mechanism of selective laser sintering. Annals of the CIRP 52 (2003) 1, S. 177-184.

KORIES & SCHMIDT-WALTER 2004

Kories, R.; Schmidt-Walter, H.: Taschenbuch der Elektrotechnik. 6., erweiterte Aufl. Frankfurt am Main: Harri Deutsch 2004. ISBN: 3-81711-734-5.

KRATOCHVÍL & CARSON 2005

Kratochvil, M.; Carson, C.: Growing Modular. 1. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-54023-959-6.

KRUTH & VANDENBROUCKE 2007

Kruth, J. P.; Vandenbroucke, B.: Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. Rapid Prototyping Journal 13 (2007) 4, S. 196-203.

KRUTH et al. 2005

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

KRUTH et al. 2004

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

KVASNA et al. 2003

Kvasna, L.; Remenova, P.; Turna, M.; Härtl, J.; Zäh, M. F.: Angepasste Prozessgase für das Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern. In: CO-MAT-TECH. Trnava, Slowakei, 16.-17. Oktober 2003.

KYOGOKU et al. 2003

Kyogoku, H.; Ramos, J. A.; Bourell, D. L.: Laser melting of Ti-Ni shape memory alloy. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, Bd 14. Austin, Texas, USA, 4.-6. August 2003. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2003, S. 668-675.

LINDEMANN et al. 2006

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

MATZ 1999

Matz, J. E.: *Carbide Formation in a Nickel-Based Superalloy during Electron Beam Solid Freeform Fabrication*. Diss. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, Massachusetts, USA (1999).

MEINDL 2005

Meindl, M.: *Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing*. Diss. TU München (2004). München: Utz 2005. ISBN: 3-83160-465-7. (*iwb Forschungsberichte* 187).

MERCELIS & KRUTH 2005

Mercelis, P.; Kruth, J. P.: Residual Stresses in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting. *Rapid Prototyping Journal* 12 (2005) 5, S. 254-265.

MERKLEIN 2001

Merklein, M.: *Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften*. Diss. Universität Erlangen (2001). Bamberg: Meisenbach 2001. (*Fertigungstechnik* 116).

MUMTAZ et al. 2006

Mumtaz, K. A.; Hopkinson, N.; Erasenthiran, P.: High density selective laser melting of waspaloy. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 17. Austin, Texas, USA, 14.-16. August 2006. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2006, S. 220-232.

NEGELE 1998

Negele, H.: Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung. Diss. TU München (1998). München: Utz 1998. ISBN: 3-83160-384-7. (Systems Engineering).

PAHL et al. 2007

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 3-54034-060-2.

PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin: Springer 1982. ISBN: 0-38711-783-0.

PILLER 2006

Piller, F. T.: Mass Customization. 4. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006. ISBN: 3-83500-355-0.

PULM 2004

Pulm, U.: Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. Diss. TU München (2004). München: Dr. Hut 2004. ISBN: 3-89963-062-9.

QI et al. 2006

Qi, H. B.; Yan, Y. N.; Lin, F.; He, W.; Zhang, R. J.: Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Engineering Manufacture 202 (2006) 11, S. 1845-1853.

RADAJ 1992

Radaj, D.: Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Distortion. Berlin: Springer 1992. ISBN: 0-38754-820-3.

RAPATZ & KRAINER 1962

Rapatz, F.; Krainer, H.: Die Edelstähle. 5., verbesserte und erweiterte Aufl. Berlin: Springer 1962.

RAZNJEVIC 1977

Raznjevic, K.: Thermodynamische Tabellen. Düsseldorf: VDI 1977. ISBN: 3-18400-281-0.

REDDY & GARTLING 2000

Reddy, J. N.; Gartling, D. K.: The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics. 2. Aufl. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press 2000. ISBN: 1-42008-598-0.

REICHWALD & PILLER 2006

Reichwald, R.; Piller, F.: Interaktive Wertschöpfung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2006. ISBN: 3-83490-106-7.

RM-PLATFORM 2006

Feenstra, F. (Senior Project Manager): Strategic Research Agenda <www.rm-platform.com> - 11.01.2009.

ROMBOUTS et al. 2009

Rombouts, M.; Kruth, J. P.; Froyen, L.: Impact of physical phenomena during selective laser melting of iron powders. Fabrication, Materials, Processing and Properties 1 (2009) o. Nr., S. 397-404.

SACHVERSTÄNDIGENRAT 2008

Sachverständigenrat (Hrsg.): Jahresgutachten 2008/2009 des Sachverständigenrats zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung: Die Finanzkrise meistern - Wachstumskräfte stärken. 1. Aufl. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2008. ISBN: 3-82460-827-8.

SAHM et al. 2001

Sahm, P. R.; Egry, I.; Volkmann, T. (Hrsg.): Schmelze, Erstarrung, Grenzflächen: Eine Einführung in die Physik und Technologie flüssiger und fester Metalle. 1. Aufl. Berlin: Springer 2001. ISBN: 2-54041-566-1.

SCHEBESTA 1976

Schebesta, W.: Untersuchungen zur Aufklärung über die Tiefenwirkung beim Auftreffen höherenergetischer Elektronenstrahlen auf Metalloberflächen. Diss. TU Wien (1976).

SCHENK & WIRTH 2004

Schenk, M.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. 1. Aufl. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-54020-423-7.

SCHILLER 2007

Schiller, F.: Modellbildung und Simulation. Vorlesungsmanuskript. TU München (2007).

SCHILLER et al. 1977

Schiller, S.; Heisig, U.; Panzer, S.: Elektronenstrahltechnologie. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft 1977. ISBN: 3-80470-533-2.

SCHLÜNDER & TSOTSAS 1988

Schlünder, E.-U.; Tsotsas, E.: Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten. 33 Tabellen. Stuttgart: Thieme 1988. ISBN: 3-13713-001-8.

SCHÖNBUCHER 2002

Schönbucher, A.: Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse. 1. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 3-54042-005-3.

SCHULTZ 2000

Schultz, H.: Elektronenstrahlschweißen. 2. Aufl. Düsseldorf: DVS-Verlag 2000. ISBN: 3-87155-192-9. (Fachbuchreihe Schweißtechnik 93).

SCHUMACHER 1964

Schumacher, B. W.: A review of the macroscopic laws for the electron beam penetration through matter. In: Electron and Ion Beam Science and Technology, 1st International Conference. Toronto, Kanada. S. 5-70.

SCHUTZRECHT DE 10317822A1 2004

Schutzrecht DE 10317822A1 Patent (16.12.2004). Concept Laser GmbH. Pr.: 10317822.8. 2003-04-16. Herzog, F.; Herr, T.: Verfahren zum flächigen, schichtweisen Abtragen oder Aufschmelzen von Materialbereichen eines Werkstücks.

SEIDEL 1999

Seidel, W.: Werkstofftechnik. Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung. 3., neubearbeitete Aufl. München: Hanser 1999. ISBN: 3-44617-293-9.

SIGL 2008

Sigl, M.: Entwicklung von Rapid-Technologien am Beispiel des Elektronenstrahlsinterns. Diss. TU München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 3-83160-841-5. (*iwb* Forschungsberichte 223).

SIGL et al. 2006

Sigl, M.; Zaeh, M. F.; Lutzmann, S.: Transient Physical Effects in Electron Beam Sintering. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 17. Austin, Texas, USA, 14.-16. August 2006. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2006, S. 397-405.

SIH & BARLOW 1995

Sih, S. S.; Barlow, J. W.: Emissivity of Powder Beds. In: Marcus, H. L.; Beaman, J. J.; Barlow, J. W.; Bourell, D. L.; Crawford, R. H. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 6. Austin, Texas, USA, 7.-9. August 1995. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 1995, S. 402-408.

SOMMERKAMP 1970

Sommerkamp, P.: Elektronen-Rückstreuungsmessungen an Ta und Ni, ein Beitrag zur Leistungsbilanz des Elektronenstrahlschmelzens. Zeitschrift für angewandte Physik 28 (1970) 4, S. 220-232.

STÖCKER 2007

Stöcker, H.: Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten. Nachdr. der 5., korrigierten Aufl. Frankfurt am Main: Harri Deutsch 2007. ISBN: 3-81711-720-5.

STROPPE 2003

Stroppe, H.: Physik für Studenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften. 12., neu bearbeitete Aufl. Leipzig: Hanser Fachbuchverlag 2003. ISBN: 3-44622-537-4.

SUN 1991

Sun, M. S.: Physical Modelling of the Selective Laser Sintering Process. Diss. The University of Texas at Austin (1991).

TSOTSAS & MARTIN 1987

Tsotsas, E.; Martin, H.: Thermal conductivity of packed beds: A review. Chemical Engineering Process 22 (1987) 1, S. 19-37.

VAN ELSSEN et al. 2007

Van Elsen, M.; Baelmans, M.; Mercelis, P.; Kruth, J. P.: Solutions for modelling moving heat sources in a semi-infinite medium and applications to laser material processing. International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 23-24, S. 4872-4882.

VDI 3258 1962

VDI 3258: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen. Düsseldorf: VDI 1962.

VDI 3404 2009

VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren - Rapid Technologien (Rapid Prototyping), Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Düsseldorf: VDI 2009.

VDI 3633 1993

VDI 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Düsseldorf: VDI 1993.

VDI-WÄRMEATLAS 2002

VDI-Wärmeatlas: VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 9., überarbeitete und erweiterte Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 3-54041-200-X.

WAGNER 2003

Wagner, C. A.: Untersuchungen zum selektiven Lasersintern von Metallen. Diss. RWTH Aachen (2003): Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-83221-538-7. (Berichte aus der Produktionstechnik).

WALTHER 2001

Walther, C.: Systemtechnische Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionen großer Systeme. Diss. TU München (2001). München: Utz 2001. ISBN: 3-89675-816-0. (Systems Engineering).

WECK 1996

Weck, M.: Fertigungssysteme, meßtechnische Untersuchung und Beurteilung. 4., neubearbeitete und erweiterte Aufl. Düsseldorf: VDI 1996. ISBN: 3-18401-239-5. (Werkzeugmaschinen 4).

WIESNER 1989

Wiesner, P.: Technologie des Elektronenstrahlschweißens. 1. Aufl. Berlin: Verl. Technik 1989. ISBN: 3-341-00640-0.

WITHERS & BHADESHIA 2001

Withers, P. J.; Bhadeshia, H. K.: Residual Stresses, part 2 - nature and origin. Materials Science and Technology 17 (2001) 17, S. 366-375.

WITT 2005

Witt, G. (Hrsg.): Taschenbuch der Fertigungstechnik. 1. Aufl. München: Hanser 2005. ISBN: 3-44622-540-4.

WOHLERS 2007

Wohlers, T.: Wohlers Report 2007. Fort Collins, Colorado, USA: Wohlers Associates 2007. ISBN: 0-97544-293-7.

YADROITSEV et al. 2007

Yadroitsev, I.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Parametric Analysis of the selective laser melting process. Applied Surface Science 253 (2007) 19, S. 8064-8069.

YASA et al. 2009

Yasa, E.; Deckers, J.; Craeghs, T.; Badrossamay, M.; Kruth, J. P.: Investigation on Occurrence of Elevated Edges in Selective Laser Melting. In: Bourell, D. L.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.; Wood, K. L.; Marcus, H. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Bd 20. Austin, Texas, USA, 3.-5. August 2009. Boston, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publisher 2009, S. 673-685.

YOUNG 1805

Young, T.: An Essay on the Cohesion of Fluids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 95 (1805) o. Nr., S. 65-87.

ZÄH 2003

Zäh, M. F.: Vorstudie zum Einsatz des Elektronenstrahls in der generativen Fertigung. Abschlussbericht für die Bayerische Forschungsförderung. TU München (2003).

ZÄH 2006

Zäh, M. F. (Hrsg.): Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. 1. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 2-44622-854-3.

ZÄH 2007

Zäh, M. F.: Verfahrensentwicklung zur schichtweisen Herstellung metallischer Bauteile mittels Elektronenstrahl (EBS). Abschlussbericht für die Bayerische Forschungsförderung. TU München (2007).

ZÄH et al. 2004

Zäh, M. F.; Wagner, W.; Ulrich, C.: Demografischer Wandel und Produktion. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 11, S. 604-608.

ZAEH et al. 2007

Zaeh, M. F.; Branner, G.; Kahnert, M.: Adaptive Scanning Strategies for Metal processing Additive Layer Manufacturing Methods. In: Geiger, M.; Otto, A. H. (Hrsg.): 5th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering, Bd 5. Erlangen, 25.-28. September 2007. Bamberg: Meisenbach 2007.

ZEHNER & SCHLÜNDER 1970

Zehner, P.; Schlünder, E.-U.: Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen bei mäßigen Temperaturen. Chemie-Ingenieur-Technik. 1970 (1970) 42, S. 933-941.

ZENKER 2003

Zenker, R.: Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung: Innovative Technologien für höchste industrielle Ansprüche. Planegg: probeam 2003.

Anhang

1. Tabellarische Dokumentation des FEM-Simulationsmodells

Tabelle 14: Model Properties

Property	Value
Model name	Electron Beam Melting (Elektronenstrahlschmelzen)
Model description	The purpose of this simulation model is to predict parameter settings which can be used in the Electron Beam Melting process. It is based upon a mathematical description of the energy transfer from the electron beam into the metal powder. Furthermore, powder properties are being predicted by use of relevant literature as well as experimental data. Finally, the model was validated in the specific parameter range from 90 W - 200 W beam power as well as from 25 mm/s - 200 mm/s scan speed.
Author	Dipl.-Ing. Stefan Lutzmann
Company	Technische Universität München (TUM)
Department	iwb Anwenderzentrum Augsburg
URL	www.iwb-augsburg.de ; www.iwb.tum.de
Saved date	Jan 25, 2010 2:27:41 PM
Creation date	Oct 23, 2007 12:10:47 PM
COMSOL version	COMSOL 3.5.0.603
File name	C:\Documents and Settings\ls\Desktop\ 20100125_EBM_Prozessmodell_ib2_vs200.mph
Application modes and modules used in this model	Geom1
	Space dimensions: 2D
	Independent variables: x, y, z
	Geom2
	Space dimensions: 3D
	Independent variables: Xm, Ym, Zm
	Heat Transfer by Conduction
	Moving Mesh (ALE)

Tabelle 15: Scalar Expressions

Name	Expression	Unit	Description
t_scan	L_Mod/Geschw	s	Scandauer
y_bew	$(Y_m - \text{Geschw} \cdot t) + d_{\text{Fl}}/2$	m	zeitabhängige y-Koordinate der Energiequelle
z_unten	-EDT	m	z-Koordinate, unter der die Leistung = 0 gesetzt wird
WQ	$\eta_v \cdot \eta_f \cdot P_{\text{EB}} \cdot 1/(2 \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot \text{EDT}) \cdot I_{xy} \cdot I_{\text{rechts}}$	W/m ³	Wärmequelle
WQ_fest	$3.915e9 \cdot \eta_v \cdot \eta_f \cdot P_{\text{EB}} \cdot \sigma^{-2} / (2 \cdot \pi \cdot (\text{EDT}_{\text{konstfest}})) \cdot I_{xy} \cdot I_{\text{zfest}}$	W/m ³	ortsfeste Wärmequelle
WQ_links	$WQ_{\text{fest}} \cdot (X_m0) \cdot 0$	W/m ³	linker Teil der Wärmequelle
I_xy	$\exp(-1/2 \cdot (((X_m - (d_{\text{Fl}} \cdot (1 - \text{hatch}) - d_{\text{Fl}}/2))/\sigma)^2 + (y_{\text{bew}}/\sigma)^2)) \cdot XY_{\text{Grenze}}$	1	horizontale Intensitätsverteilung
I_rechts	$(-3 \cdot ((-Z_m)/\text{EDT})^2 + 2 \cdot (-Z_m)/\text{EDT} + 1) \cdot (Z_m > z_{\text{unten}}) + (Z_m \leq z_{\text{unten}}) \cdot 0$	1	vertikale Intensitätsverteilung (rechte Seite)
z_untenfest	$-(\text{EDT}_{\text{konstfest}} + 56.97e-6)$	m	vertikale Hilfskonstante
I_zfest	$-1 \cdot (Z_m + 48.1e-6) \cdot (Z_m + 83.1e-6) \cdot k_{\text{flzfest}}^2 \cdot (-56.97e-6 \geq Z_m) \cdot (Z_m > z_{\text{untenfest}}) + (Z_m \leq z_{\text{untenfest}}) \cdot 0 + (Z_m > -56.97e-6) \cdot 0$	1	ortsfeste vertikale Intensitätsverteilung
EDT_konstfest	$\text{Korrekturfaktor} \cdot 2.1e-12[\text{m}] \cdot (U_{\text{Beschl}}^2)/7.9/100$	m	korrigierte ortsfeste Eindringtiefe des Elektronenstrahls
WQ_rechts	$WQ \cdot (X_m > 0) + WQ \cdot (X_m < 0) \cdot 1$	W/m ³	rechter Teil der Wärmequelle
XY_Grenze	$((((y_{\text{bew}})^2 + (X_m + (d_{\text{Fl}} \cdot 0.5 - d_{\text{Fl}} \cdot (1 - \text{hatch})))^2) \leq (d_{\text{Fl}}/2)^2) \cdot 1 + (((y_{\text{bew}})^2 + (X_m)^2) > (d_{\text{Fl}} \cdot (1 - \text{hatch}))^2) \cdot 0$	m ²	horizontaler Grenzbereich der Wärmequelle

sigma	$d_{Fl}/2 \cdot \sqrt{-1/(2 \cdot \log(1-u))}$	m	Standard- abweichung
z_ versch	deform_neu(T [1/K])		Verschiebung in Z-Richtung bei Absinken des Pulvers
EDT	$(EDT_{konst} + (-z_{versch})) \cdot (1.5 \cdot \rho_{14404_Pulver_neu}(T[1/K]) / 7900) + EDT_{konst} \cdot 0$	m	Eindringtiefe mit Verschiebung in Abh. der Dichte (in positiver Richtung)
P_EB	$U_{Beschl} \cdot I_{Strahl} \cdot (t \leq t_{scan}) + 0 \cdot (t > t_{scan})$	W	Elektronenstrahl- leistung (< 10 kW)
EDT_ konst	Korrekturfaktor $\cdot 2.1e-12[m] \cdot (U_{Beschl}^2)/3.4/100$	m	Eindringtiefe in Abh. der Beschleu- nigungsspannung
k_ isotrop	$k_{14404_Pulver_neu}(T[1/K])[W/(m \cdot K)] \cdot (Y_m \geq y_{bew}) + k_{14404_fest}(T[1/K])[W/(m \cdot K)] \cdot (Y_m < y_{bew})$	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit im Aufschmelz- und Abkühlvorgang
rho_ Aus- druck	$\rho_{14404_Pulver_neu}(T[1/K]) \cdot (t \leq t_{scan}) + 7900[kg/m^3] \cdot (t > t_{scan})$	kg/m^3	Dichte im Aufschmelz- und Abkühlvorgang
CP_E	$cP_{14404}(T[1/K]) + \text{Verteilung} \cdot \text{Schmelzenthalpie}$	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärme- kapazität von Pulver 1.4404
CP_EPl	$\text{SchmelzenthalpiePl} \cdot \text{VerteilungPl} + 133[J/(kg \cdot K)]$	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität von Pulver 1.4404 mit Schmelzenthalpie
Vertei- lungPl	$(2/(T_{diffPl} \cdot W_u \cdot \pi)) \cdot \exp(-(T - T_{mittelPl})^2 / (T_{diffPl})^2)$	1/K	Hilfsfunktion für horizontale Intensitätsvertei- lung
TdiffPl	$T_{liqPl} - T_{solPl}$	K	Temperaturdifferenz zwischen Liquidus- und Solidustempera- tur
Tmittel Pl	$T_{solPl} + (T_{liqPl} - T_{solPl})/2$	K	Mittentemperatur

Tdiff	Tliq-Tsol	K	Differenz von Tliq und Tsol
Verteilung	$(2/(Tdiff \cdot Wu_pi)) \cdot \exp(-(T-Tmittel)^2/(Tdiff)^2)$	1/K	Verteilung der Schmelzenthalpie
Tmittel	$Tsol+(Tliq-Tsol)/2$	K	Mittel von Tliq und Tsol
a	d_Fl/2	m	Radius des Strahl-auff treffbereichs des Elektronenstrahls
emiss_Auf-treff-bereich	emiss_14404_fest_neu(T[1/K])	-	Emissionskoeffizient des Auftreffbereichs
hatch	0.6	-	anteilige Strahl-überlappung
emiss_Auf-treff-bereich Pulver	$emiss_14404_Pulver_neu(T[1/K]) \cdot (Ym \geq y_bew) + emiss_14404_fest_neu(T[1/K]) \cdot (Ym < y_bew)$	-	Emissionskoeffizient des Pulverwerkstoffs
k_14404_fest-Werte	$k_14404_fest(T[1/K])[W/(m \cdot K)]$	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit von Feststoff 1.4404
k_pulver-Werte	$k_14404_Pulver_neu(T[1/K])[W/(m \cdot K)]$	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit von Pulver 1.4404

Tabelle 16: Mesh Statistics

Mesh Property	Value
Number of degrees of freedom	844
Number of mesh points	844
Number of elements	3507
Tetrahedral	3507
Prism	0
Hexahedral	0
Number of boundary elements	1531
Triangular	1531
Quadrilateral	0
Number of edge elements	265
Number of vertex elements	24
Minimum element quality	0.352
Element volume ratio	0.013

Tabelle 17: Application Mode Properties (Heat Transfer by Conduction (ht))

Application Mode Property	Value
Application mode type	Heat Transfer by Conduction
Application mode name	ht
Default element type	Lagrange - Quadratic
Analysis type	Transient
Frame	Frame (mesh)
Weak constraints	Off
Constraint type	Ideal

Tabelle 18: Variables (Heat Transfer by Conduction (ht))

Variables	Value
Dependent variables	T
Shape functions	shlag(1,'T'), shlag(2,'T')
Interior boundaries	active

Tabelle 19: Boundary Settings 1 (Heat Transfer by Conduction (ht))

Boundary	Unit	6, 10-11, 13, 17-18	12, 16, 19-20, 23	14
Type		Continuity	Thermal insulation	Heat flux
Name			Oberfläche_ Pulveriso	Oberfläche_ PulverWf
Heat transfer coefficient (h)	W/(m ² · K)	0	0	0
External temperature (Tinf)	K	273.15	0	0
Problem-dependent constant (Const)	W/(m ² · K ⁴)	0	5.6704e-8 · 0.945	5.6704e-8 · 0.945
Ambient temperature (Tamb)	K	0	T_U	T_U
Temperature (T0)	K	273.15	0	0

Tabelle 20: Boundary Settings 2 (Heat Transfer by Conduction (ht))

Boundary	Unit	15, 21	4, 7	1-3, 5, 8-9, 22
Type		Heat flux	Heat flux	Heat flux
Name		Auftreff- bereich- pulver	Oberfläche_ Auftreffbereich	Aussenflächen_ 1373K_Feststoff
Heat transfer coefficient (h)	W/(m ² · K)	0	0	20000 · k_14404_ festWerte[1/m]
External temperature (Tinf)	K	0	0	T_U
Problem-dependent constant (Const)	W/(m ² · K ⁴)	5.6704e-8 · emiss_Auf- treffbe- reichpulver	5.6704e-8 · emiss_ Auftreffbereich	0
Ambient temperature (Tamb)	K	T_U	T_U	T_U
Temperature (T0)	K	0	0	1373

Tabelle 21: Subdomain Settings (Heat Transfer by Conduction (ht))

Subdomain	Unit		1-2	3-4
Shape functions (shape)		shlag(1,'T') shlag(2,'T')	shlag(1,'T') shlag(2,'T')	shlag(1,'T') shlag(2,'T')
Name		Kugel	Auftreff- bereichvers	Auftreff- bereichpuls
Thermal conductivity (k)	W/(m · K)	71.6[W/(m · K)]	k_14404_ festWerte	k_isotrop
Density (rho)	kg/m ³	21450[kg/m ³]	7900	rho_Ausdruck
Heat capacity at constant pressure (C)	J/(kg · K)	CP_EPI	720	CP_E
Heat source (Q)	W/m ³	WQlinks	WQlinks	WQrechts
Initial Subdomain Temperature (T)	K	T_0	T_0	T_0

Tabelle 22: Application Mode Properties (Moving Mesh (ale))

Application Mode Property	Value
Application mode type	Moving Mesh (ALE)
Application mode name	ale
Default element type	Lagrange - Quadratic
Smoothing method	Winslow
Analysis type	Transient
Allow remeshing	Off
Defines frame	Frame (ale)
Original reference frame	Frame (ale)
Motion relative to	Frame (mesh)
Weak constraints	On
Constraint type	Non-ideal

Tabelle 23: Variables (Moving Mesh (ale))

Variables	Value
Dependent variables	-
Shape functions	shlag(2,'lm2'), shlag(2,'lm3'), shlag(2,'lm4'), shlag(2,'x'), shlag(2,'y'), shlag(2,'z')
Interior boundaries	not active

Tabelle 24: Subdomain Settings (Moving Mesh (ale))

Subdomain	Unit	1-2	3-4
Shape functions (shape)	-	shlag(2,'lm2') shlag(2,'lm3') shlag(2,'lm4') shlag(2,'x') shlag(2,'y') shlag(2,'z')	shlag(2,'lm2') shlag(2,'lm3') shlag(2,'lm4') shlag(2,'x') shlag(2,'y')
Integration order (gporder)	-	4 4 4	4 4 4
name	-	-	Auftreffbereich
type	-	No displacement	Prescribed
Displacement expressions (presexpr)	m	{0;0;0}	{0;0;z_versch}
Initial spatial coordinate (x)	m	xinit_ale	xinit_ale
Initial spatial coordinate (y)	m	yinit_ale	yinit_ale
Initial spatial coordinate (z)	m	zinit_ale	zinit_ale

Tabelle 25: General Piecewise Analytic Functions - emiss_14404_Pulver_neu(T)

x _{start}	x _{end}	f(x)
300	1400	$2.6363e-4 \cdot T + 0.58$
1400	1658	0.95
1658	2273	$0.95 - 0.66 \cdot \text{flc1hs}(T - 1680.5, 22.5)$

Tabelle 26: General Piecewise Analytic Functions - $\text{emiss_14404_fest_neu}(T)$

x_{start}	x_{end}	$f(x)$
300	1400	$4e-4 \cdot T + 0.3563$
1400	1658	$-5.06e-7 \cdot (T-1658)^2 + 0.95$
1658	1703	$0.95 - 0.66 \cdot \text{flc1hs}(T-1680.5, 22.5)$
1703	2273	0.29

Tabelle 27: General Piecewise Analytic Functions - $k_{14404_Pulver_neu}(T)$

x_{start}	x_{end}	$f(x)$
293	1658	$5.86e-5 \cdot T + 0.013$
1658	1703	$0.11 + 35.3462 \cdot \text{flc1hs}(T-1680.5, 21)$
1703	1773	$-2.05e-4 \cdot (T-1773)^2 + 36.4642$

Tabelle 28: Constants

Name	Expression	Value	Description
eta_v	0.788	0.788	Verfahrenstechnischer Wirkungsgrad
eta_f	0.99	0.99	Wirkungsgrad Leistungsverluste
Korrekturfaktor	$1[s^6 \cdot A^2/(m^4 \cdot kg^2)]$	$1[s^6 \cdot A^2/(m^4 \cdot kg^2)]$	Einheitenkorrektur bei Formel zur Eindringtiefe
u	0.9	0.9	Anteil der enthaltenen Leistung
T_U	298[K]	298[K]	Temperatur der Vakuumkammer: 25 °C
L_Mod	2.0e-3 [m]	0.002[m]	Bauteillänge
Schmelzenthalpie	276 [kJ/kg]	2.76e5[J/kg]	Schmelzenthalpie
Tsol	1658 [K]	1658[K]	Solidustemperatur
Tliq	1703 [K]	1703[K]	Liquidustemperatur
rho_Ausdruck_fest	7900 [kg/m^3]	7900[kg/m^3]	Dichte des Feststoffs
U_Beschl	100 [kV]	1e5[V]	Beschleunigungsspannung (60 kV - 100 kV)
I_Strahl	2[mA]	0.002[A]	Strahlstrom (1 mA - 100 mA)
Geschw	200[mm/s]	0.2[m/s]	Scangeschwindigkeit [m/s]
d_Fl	4e-4[m]	(4e-4)[m]	Elektronenstrahlfläche Durchmesser
T_0	298[K]	298[K]	Anfangstemperatur nach dem Aufheizen
kflzfest2	1 [1/m^2]	1[1/m^2]	Einheitenkorrektur
SchmelzenthalpiePl	100[kJ/kg]	1e5[J/kg]	Hilfswert 3

Tabelle 29: Functions

Function	Expression	Derivatives	Complex
deform_neu(T)	$-5e-5 \cdot \text{flc1hs}(T-1601,98)$	$d(-5e-5 \cdot \text{flc1hs}(T-1601,98),T)$	false
rho_14404_Pulver_neu(T)	$3400+4500 \cdot \text{flc1hs}(T-1680.5,21)$	$d(3400+4500 \cdot \text{flc1hs}(T-1680.5,21),T)$	false

Tabelle 30: Piecewise Cubic Interpolation of Function k_{14404_fest}

x	f(x)	x	f(x)
293.0	15	1173.0	28
373.0	16	1273.0	29
473.0	18	1373.0	30.7042
573.0	19	1473.0	32.1442
673.0	21	1573.0	33.5842
773.0	22	1673.0	35.0242
873.0	24	1773.0	36.4642
973.0	25	2273.0	43.6642
1073.0	26		

Tabelle 31: Piecewise Cubic Interpolation of Function cP_{14404}

x	f(x)	x	f(x)
293.0	470	1373.0	680
373.0	500	1473.0	700
473.0	530	1573.0	720
573.0	530	1673.0	740
673.0	560	1703.0	750
773.0	580	1773.0	750
873.0	600	1873.0	750
973.0	610	1973.0	750
1073.0	610	2073.0	750
1173.0	630	2173.0	750
1273.0	650	2273.0	750

Tabelle 32: General Solver Settings

Parameter	Value
Solve using a script	off
Analysis type	Transient
Auto select solver	On
Solver	Time dependent
Solution form	Automatic
Symmetric	auto
Adaptive mesh refinement	Off
Optimization/Sensitivity	Off
Plot while solving	Off

Tabelle 33: Settings of Direct UMFPACK Solver

Parameter	Value
Solver type	Linear system solver
Pivot threshold	0.1
Memory allocation factor	0.7
Check tolerances	On
Relative tolerance	1.0E-6
Factor in error estimate	400.0

Tabelle 34: Time Stepping

Parameter	Value
Times	range(0,1e-5,0.016)
Relative tolerance	0.001
Absolute tolerance	0.0001
Times to store in output	Specified times
Time steps taken by solver	Strict
Maximum BDF order	5
Singular mass matrix	Maybe
Consistent initialization of DAE systems	Backward Euler
Error estimation strategy	Include algebraic
Allow complex numbers	Off

Tabelle 35: Advanced Solver Settings

Parameter	Value
Constraint handling method	Elimination
Null-space function	Automatic
Automatic assembly block size	On
Assembly block size	5000
Use Hermitian transpose of constraint matrix and in symmetry detection	Off
Use complex functions with real input	Off
Stop if error due to undefined operation	Off
Store solution on file	On
Type of scaling	Automatic
Manual scaling	-
Row equilibration	On
Manual control of reassembly	Off
Load constant	On
Constraint constant	On
Mass constant	On
Damping (mass) constant	On
Jacobian constant	On
Constraint Jacobian constant	On

Tabelle 36: Point Variables

Name	Description	Unit	Expression
xinit_ale	x coordinate initial value	m	Xm
yinit_ale	y coordinate initial value	m	Ym
zinit_ale	z coordinate initial value	m	Zm

Tabelle 37: Edge Variables

Name	Description	Unit	Expression
xinit_ale	x coordinate initial value	m	Xm
yinit_ale	y coordinate initial value	m	Ym
zinit_ale	z coordinate initial value	m	Zm

Tabelle 38: Boundary Variables

Name	Description	Unit	Expression
nflux_ht	Normal heat flux	W/m ²	$nXm_ht \cdot fluxXm_ht + nYm_ht \cdot fluxYm_ht + nZm_ht \cdot fluxZm_ht$
xinit_ale	x coordinate initial value	m	Xm
yinit_ale	y coordinate initial value	m	Ym
zinit_ale	z coordinate initial value	m	Zm

Tabelle 39: Subdomain Variables

Name	Description	Unit	Expression
fluxXm_ ht	Heat flux, Xm component	W/m ²	$-kXmXm_ht \cdot TXm - kXmYm_ht \cdot TYm - kXmZm_ht \cdot TZm$
fluxYm_ ht	Heat flux, Ym component	W/m ²	$-kYmXm_ht \cdot TXm - kYmYm_ht \cdot TYm - kYmZm_ht \cdot TZm$
fluxZm_ ht	Heat flux, Zm component	W/m ²	$-kZmXm_ht \cdot TXm - kZmYm_ht \cdot TYm - kZmZm_ht \cdot TZm$
gradT_ht	Temperature gradient	K/m	$\text{sqrt}(TXm^2 + TYm^2 + TZm^2)$
flux_ht	Heat flux	W/m ²	$\text{sqrt}(\text{fluxXm_ht}^2 + \text{fluxYm_ht}^2 + \text{fluxZm_ht}^2)$
xinit_ale	x coordinate initial value	m	Xm
yinit_ale	y coordinate initial value	m	Ym
zinit_ale	z coordinate initial value	m	Zm
dx_ale	x-displacement	m	x-Xm
dy_ale	y-displacement	m	y-Ym
dz_ale	z-displacement	m	z-Zm

2. Berechnung der Maschinenstundensätze

Tabelle 40: Vergleich der Maschinenstundensätze von marktüblichen Anlagen für das Elektronenstrahlschmelzen und das Laserstrahlschmelzen

Kostenart bzw. relevante Größe	Formelzeichen bzw. Formel	Ein- heit	EB	Laser
Wiederbeschaffungswert	W_{WB}	€	630.000	460.000
Nutzungsdauer	N_D	a	8	8
Arbeitszeit pro Jahr	E_Z	h/a	4.000	4.000
Verfügbarkeit	V_A	%	90	90
Abschreibungskosten	$K_{AS}=W_{WB}/(N_D \cdot E_Z \cdot V_A)$	€/h	21,87	15,97
Zinssatz	Z_S	%	7	7
Kalkulat. Zinskosten	$K_Z=W_{WB} \cdot Z_S/(2 \cdot E_Z \cdot V_A)$	€/h	6,13	4,47
Betriebskosten pro Fläche	B_F	€/m ²	200,-	200,-
Flächenbedarf der Anlage	F_A	m ²	16	12
Raumkosten	$K_R=F_A \cdot B_F/E_Z$	€/h	0,80	0,60
Nennleistung	P_N	kW	7	5
Strompreis	K_{SK}	€/(kWh)	0,19	0,19
Nutzungsfaktor	N_F	%	70	70
Energiekosten	$K_E=P_N \cdot K_{SK} \cdot N_F$	€/h	0,93	0,67
Instandhaltungskostensatz	I_{KS}	%	5	5
Instandhaltungskosten	$K_I=W_{WB} \cdot I_{KS}/(N_D \cdot E_Z \cdot V_A)$	€/h	1,09	0,80
Schutzgaspreis (Stickst.)	K_G	€/m ³	-	0,30
Durchschn. Gasverbrauch	V_G	m ³ /h	-	3
Schutzgaskosten	$K_{SG}=K_G \cdot V_G$	€/h	-	0,90
Maschinenstundensatz (Vor- u. Nachbereitung)	$K_{MH}=K_{AS}+K_Z+K_R+K_E+K_I$	€/h	30,82	22,51
Maschinenstundensatz (Fertigungsbetrieb)	$K_{MH}=K_{AS}+K_Z+K_R+K_E+K_I+K_{SG}$	€/h	30,82	23,41

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelerstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauener, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrb, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Frang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schrüfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wischbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaes, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitioncontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter einsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deuschle, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Plersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Plöb, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65886-3

Seminarberichte iw b

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

Seminarberichte iw b sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leitetchnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

Forschungsberichte iw b

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

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Moßmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelman, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißenberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingen
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konurfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickenrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrensbewegungen
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert
Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
2010 · 176 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Vollner
Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
2010 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 Nils Müller
Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
2010 · 270 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 Franz Decker
Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
2010 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 Christian Lau
Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 Christoph Rimpau
Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 Michael Loy
Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung
2010 · 169 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 Andreas Eursch
Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
2010 · 205 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-4029-4

- 242 Florian Schwarz
Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
2010 · 256 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4030-0
- 243 Martin Georg Prasch
Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
2010 · 261 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4033-1
- 244 Johannes Schilp
Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
2011 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4063-8
- 245 Stefan Lutzmann
Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
2011 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4070-6
- 246 Gregor Branner
Modellierung transients Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
2011 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4071-3

