

Technische Universität München
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

**Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim
Elektronenstrahlschmelzen (EBM)**

Dipl.-Ing. (Univ.)
Markus Kahnert

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. H.-J. Kaltenbach

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. G. Witt
Universität Duisburg-Essen

Die Dissertation wurde am 29.08.2013 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.01.2014
angenommen.

Markus Kahnert

**Scanstrategien zur verbesserten
Prozessführung beim
Elektronenstrahlschmelzen (EBM)**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 293

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

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 · 2015

ISBN 978-3-8316-4416-2

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 iwv 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 iwv. 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 iwv Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des iwv veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

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

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungstechnik der Universität Duisburg - Essen, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jakob Kaltenbach danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Meinen Dank möchte ich im Besonderen auch an alle Werkstätten und Labore für die unkomplizierte und angenehme Zusammenarbeit aussprechen. Dem Forschungsfeld Additive Fertigung danke ich für die vielfältigen konstruktiv-kritischen Beiträge und Anregungen zu dieser Arbeit.

In besonderer Weise möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich während meines bisherigen Lebensweges begleitet und durch ihre Unterstützung meine Ausbildung ermöglicht hat. Schließlich danke ich meiner Frau Eva für ihre Geduld und ihren immerwährenden Rückhalt. Sie hat damit maßgeblich zur Entstehung und zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen.

Augsburg, im März 2014

Markus Kahnert

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Motivation der Arbeit.....	4
1.2.1	Das generative Verfahrensprinzip	4
1.2.2	Entwicklung, Abgrenzung und kommerzieller Einsatz generativer Fertigungsverfahren.....	5
1.2.3	Potenziale generativer Fertigungsverfahren	7
1.2.4	Metallische Werkstoffe in der generativen Fertigung	8
1.2.5	Einfluss von Scanstrategien auf die generative Fertigung	9
1.3	Zusammenfassung.....	11
1.4	Zielsetzung und Struktur der Arbeit	13
1.4.1	Allgemeines	13
1.4.2	Zielsetzung.....	13
1.4.3	Vorgehensweise und Struktur der Arbeit	14
2	Stand der Forschung und Technik	17
2.1	Allgemeines	17
2.2	Definitionen	17
2.2.1	Allgemeines	17
2.2.2	Scanstrategie	18
2.2.3	Übersicht der Parameter einer Scanstrategie	20
2.3	Bindungsmechanismen beim selektiven Verfestigen	21
2.4	Aufbau und Funktion von Anlagen für die generative Fertigung.....	24
2.4.1	Aufbau und Funktion.....	24

2.4.2	Energiequellen für das selektive Aufschmelzen	25
2.4.3	Systeme zur Energieführung	26
2.5	Analyse von Scanstrategien	27
2.5.1	Ausgangssituation	27
2.5.2	Bewertete Scanstrategien	28
2.5.2.1	Analyse verschiedener Scanmuster	28
2.5.2.2	Einfluss von Prozessparametern auf die strahlbasierte generative Fertigung.....	34
2.5.3	Zusammenfassung	36
2.6	Der Elektronenstrahl	38
2.6.1	Allgemeines	38
2.6.2	Funktionsprinzip der Strahlerzeugung und -formung	39
2.6.3	Prozesse in metallischen Werkstoffen.....	41
2.6.4	Parameter für das Elektronenstrahlschmelzen	43
2.6.5	Potenziale des Elektronenstrahls in Bezug auf das EBM	44
2.7	Das Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	46
2.7.1	Allgemeines	46
2.7.2	Physikalische Effekte	46
2.7.3	Prozessschritte beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	48
2.7.4	Der Elektronenstrahl in der generativen Fertigung	49
2.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für das EBM	51
3	Beschreibungsmethodik für Scanstrategien	53
3.1	Allgemeines	53
3.2	Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien	54
3.2.1	Allgemeines	54

3.2.2	Anforderungen an eine Methode zur Beschreibung von Scanstrategien	56
3.2.3	Elemente zur Beschreibung von Scanstrategien.....	59
3.2.3.1	Informationsebenen für die Beschreibung von Scanstrategien	59
3.2.3.2	Beschreibung von Scanstrategieelementen.....	59
3.2.3.3	Verknüpfung der Elemente	60
3.2.4	Umsetzung im Rahmen des Elektronenstrahlschmelzens	61
3.2.5	Exemplarische Umsetzung	65
3.2.6	Darstellung des potenziellen Lösungsraumes	67
3.2.7	Vorgehensweisen zur Einschränkung des Lösungsraums	68
3.2.7.1	Allgemeines	68
3.2.7.2	Schranken zur Lösungsraumeinschränkung	69
3.2.7.3	Schritte zur Bewertung von Scanstrategien	70
3.3	Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation.....	73
3.3.1	Installierte Anlagentechnik.....	73
3.3.2	Modifikationen an der Anlagentechnik	75
3.3.2.1	Allgemeines	75
3.3.2.2	Anforderungen	76
3.3.2.3	Anlagenerweiterungen	78
3.3.2.4	Integration eines Auftragsmechanismus in die Bearbeitungskammer	80
3.3.2.5	Anlagensteuerung	81
3.3.3	Resultierender modularer Aufbau	86
3.4	Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien	87

3.4.1	Allgemeines	87
3.4.2	Anforderungen und Randbedingungen	88
3.4.3	Softwaretool	91
3.4.3.1	Allgemeines	91
3.4.3.2	Struktur und Aufbau des Softwaretools	91
3.4.3.3	Benutzeroberfläche	93
3.4.3.4	Aufbau der Datei für die Strahlablenkung	96
3.4.4	Umsetzung im Rahmen des Elektronenstrahlschmelzens	97
3.4.5	Einbindung in den Fertigungsablauf	97
3.5	Zusammenfassung	99
4	Analyse und Bewertung von Scanstrategien.....	101
4.1	Allgemeines	101
4.2	Schranke 1: Einsatz von Expertenwissen und Literaturquellen	103
4.2.1	Vorgehen	103
4.2.2	Bewertung der Scanstrategien hinsichtlich exemplarischer Zielgrößen.....	104
4.2.3	Zusammenfassung	106
4.3	Schranke 2: Simulationsuntersuchungen	107
4.3.1	Allgemeines	107
4.3.2	Simulationsmodell	108
4.3.3	Ziele	110
4.3.4	Vorgehensweise und untersuchte Parameter	111
4.3.5	Auswirkungen der Energieeinbringung	113
4.3.6	Steigerung der Prozessqualität durch adaptive Scanstrategien .	115
4.3.7	Validierung der Effekte durch Prozessuntersuchungen	118

4.3.8	Zusammenfassung	120
4.4	Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität	121
4.4.1	Allgemeines	121
4.4.2	Ziel der Untersuchungen und Versuchsplanung.....	121
4.4.3	Versuchsdurchführung zur Untersuchung unterschiedlicher Scanmuster.....	124
4.4.4	Analyse der durchgeführten Versuche	125
4.4.5	Zusammenfassung	135
4.5	Schranke 4: Optimierung der Schichtqualität durch angepasste Strahlparameter	138
4.5.1	Allgemeines	138
4.5.2	Oberflächengüte.....	138
4.5.3	Porenbildung.....	141
4.5.4	Schichtverbindung	144
4.5.5	Zusammenfassung	146
4.6	Zusammenfassung.....	147
5	Auswahl und Umsetzung von Scanstrategien.....	149
5.1	Allgemeines	149
5.2	Auswahl und Definition einer Scanstrategie.....	150
5.2.1	Mögliche Scanstrategien in der Elektronenstrahl- Universalkammeranlage	150
5.2.2	Bestimmung der Zielgrößen mit ihren Gewichtungsfaktoren ...	151
5.2.3	Bewertung und Auswahl möglicher Scanstrategien.....	152
5.3	Herstellung eines Demonstratorbauteils	154
5.4	Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens.....	158

6 Zusammenfassung und Ausblick	161
6.1 Zusammenfassung	161
6.2 Ausblick	163
7 Literaturverzeichnis	165
8 Anhang.....	181
8.1 Diagramm zur Beschreibung von Scanstrategien.....	181
8.2 Beispiel einer MiniMod-Datei	182
8.3 NC-Programme.....	183
8.4 Versuchsübersicht des Abschnitts 4.4.3	188
8.5 Versuchsübersicht der Abschnitte 4.5.2 und 4.5.4	190
8.6 Versuchsübersicht des Abschnitts 5.3	192
8.7 In der Arbeit genannte Firmen.....	193

Abkürzungsverzeichnis

Ø	Durchmesser
°	Grad
°C	Grad Celsius
μ	mikro
μm	Mikrometer
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
3D-Printing	dreidimensionales Drucken (engl.: <i>Printing</i>)
A	Ampere
AA	<i>Aluminum Association</i> (dt.: Aluminium-Vereinigung)
AB	schwed.: Aktiebolag (dt.: Aktiengesellschaft)
ABS	absolut (Angabe für die <i>MiniMod</i> -Programmierung)
AG	Aktiengesellschaft
Al	Aluminium
ALM	<i>Additive Layer Manufacturing</i> (dt.: generative Fertigung)
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (dt.: amerikanischer Standardcode für Informationsaustausch)
bezgl.	bezüglich
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
c	centi
C	Kohlenstoff
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (dt.: rechnerunterstütztes Konstruieren)

Abkürzungsverzeichnis

chem.	chemisch
CLI	<i>Common Layer Interface</i> (englische Bezeichnung des Datenformats zur Darstellung einer Bauteilschicht)
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i> (dt.: computergestützte numerische Steuerung)
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
d	dezi
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
dm ³	Kubikdezimeter
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> (Verfahrensbezeichnung, dt.: Direktes Metall-Lasersintern)
DoE	<i>Design of Experiments</i> (dt.: statistische Versuchsplanung)
dt.	deutsch
EB	<i>Electron Beam</i> (dt.: Elektronenstrahl)
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> (Verfahrensbezeichnung, dt.: Elektronenstrahlschmelzen)
EBS	<i>Electron Beam Sintering</i> (Verfahrensbezeichnung, dt.: Elektronenstrahlsintern)
engl.	englisch
EOF	<i>End of File</i> (dt.: Programmende; Angabe für die <i>MiniMod</i> -Programmierung)
EOS	Electro Optical Systems GmbH

et al.	<i>et alii</i> bzw. <i>et aliae</i> (dt.: und Andere)
evtl.	eventuell
Exp.	Experiment
FASS	<i>space-filling, self-avoiding, simple und self-similar</i> (dt.: raumfüllend, selbstausweichend, einfach und selbstähnlich)
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i> (Verfahrensbezeichnung, dt.: Schmelzschtichtung)
Fe	Eisen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIT	Fruth Innovative Technologien GmbH
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GUI	<i>Graphical User Interface</i> (dt.: grafische Benutzeroberfläche)
high-ox	<i>highly oxidized</i> (dt.: stark oxidiert)
HSC	<i>High Speed Cutting</i> (dt.: Hochgeschwindigkeitszerspanung)
Hz	Hertz
inkl.	inklusive
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München
J	Joule
k	kilo
K	Kelvin
kg	Kilogramm
KG	Kommanditgesellschaft
kV	Kilovolt

Abkürzungsverzeichnis

kW	Kilowatt
l	Liter
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (dt.: Lichtverstärkung durch angeregte Emission von Strahlung)
LM	<i>Layer Manufacturing</i> (dt.: schichtweise Fertigung)
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (Verfahrensbezeichnung)
low-ox	<i>low oxidized</i> (dt.: schwach oxidiert)
m	Meter
M	mega
mA	Milliampere
Max	Maximum
mbar	Millibar
mech.	mechanisch
MELATO	<i>Metal Laminated Tooling</i> (Verfahrensbezeichnung)
MHz	Megahertz
Min	Minimum
min	Minute
mm	Millimeter
mm ³	Kubikmillimeter
mol	molare Masse
Mo	Molybdän
ms	Millisekunde
n	Nano
N	Newton

NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (amerikanische nationale Luft- und Raumfahrtbehörde)
Nd	Neodym
Ni	Nickel
Nr.	Nummer
ns	Nanosekunde
O	Sauerstoff
PC	<i>Personal Computer</i> (dt.: Einzelplatzrechner)
REL	relativ (Angabe für die <i>MiniMod</i> -Programmierung)
rel.	relativ
RET	Return (Ende eines Unterprogramms – Angabe für die <i>MiniMod</i> -Programmierung)
RM	<i>Rapid Manufacturing</i> (dt.: schnelle Fertigung)
RöV	Röntgenverordnung
RP	<i>Rapid Prototyping</i> (dt.: schneller Modellbau)
RT	<i>Rapid Tooling</i> (dt.: schneller Werkzeugbau)
s	Sekunde
Si	Silizium
SLA	Stereolithographie
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> (Verfahrensbezeichnung, dt.: Strahlschmelzen)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Verfahrensbezeichnung, dt.: Selektives Lasersintern)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
St	Stahl

STL	<i>Standard Transformation Language</i> (englische Bezeichnung des Formats der Ausgangsdaten eines 3D-CAD Modells für die Prozesskette in der generativen Fertigung)
thermophysikal.	thermophysikalisch
Ti	Titan
TU	Technische Universität
u. a.	unter anderem
UV	Ultraviolett
V	Vanadium
UPR	Unterprogramm (Angabe für die <i>MiniMod</i> -Programmierung)
V	Volt
vgl.	vergleiche
W	Watt
W	Wolfram
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
z. B.	zum Beispiel
Zr	Zirkon

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
b	mm	Scanfeldgröße/Teilbereichsgröße
C	As	Coulomb
c_p	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität
d	mm	Schmelzbadbreite
d_F	mm	Elektronenstrahldurchmesser im Brennfleck
d_K	μm	Korndurchmesser
E	eV	Energie eines Elektrons
E	J	Energie
E_{Kin}	eV	kinetische Energie eines Elektrons
ED	J/mm ³	Energiedichte
F	N	Kraft
F_{el}	N	elektrostatische Kraft
F_K	N	Gewichtskraft eines Pulverkorns
h	mm	<i>Hatch</i> linienabstand
I_B	mA	Strahlstrom
I_H	A	Heizstrom der Kathode
I_L	A	Linsenstrom
l	mm	Schmelzbadlänge
l_s	mm	Scanvektorstrecke
m_e	kg	Masse eines Elektrons
m_K	kg	Masse eines Pulverkorns
N	-	Anzahl

Verzeichnis der Formelzeichen

n	-	Nummer der Schicht
P	kW	Elektronenstrahlleistung
Q	C	elektrische Ladung
Q _K	C	elektrische Ladung eines Pulverkorns
r	mm	Radius
R _a	µm	Mittenrauwert
R _z	µm	gemittelte Rautiefe
t	mm	Schichtdicke
t	s	Zeit
T	°C	Temperatur
T _S	°C	Schmelztemperatur
u	mm	Überlappbereich
U _A	kV	Beschleunigungsspannung
U _W	V	Wehneltspannung
v	m/s	Ablenkgeschwindigkeit des Strahlfokuspunktes
η	-	Wirkungsgrad
λ	nm	Wellenlänge
ρ	kg/dm ³	Dichte
ρ _{St}	kg/dm ³	Dichte von Stahl (angenähert)

Verzeichnis der Konstanten

Zeichen	Wert	Bedeutung
e	$1,602\,176\,487 \times 10^{-19} \text{ As}$	Elementarladung
g	$9,81 \text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung
m_{e0}	$9,109\,382\,154 \times 10^{-31} \text{ kg}$	Ruhemasse eines Elektrons
ε_0	$8,854\,187\,817 \times 10^{-12} \text{ As/Vm}$	elektrische Feldkonstante im Vakuum
π	$3,141\,592\,654$	Kreiszahl Pi

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

„Der globale Wettbewerb ist vornehmlich ein Innovationswettbewerb.“ (BULLINGER 2010, S. 161) In diesem Zusammenhang führt auch MILBERG (2004, S. 13) aus, dass *„ohne innovatives Wachstum eine nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft nicht denkbar“* sei. Dem Ökonomen Joseph Schumpeter zufolge ist hierbei die Prozessinnovation eine von fünf grundsätzlichen Möglichkeiten, um im Zusammenhang mit der Produktion stehende Inventionen erfolgreich am Markt durchzusetzen. (SCHUMPETER 1926)

Dies ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass insbesondere aktuelle Marktentwicklungen immer häufiger eine Individualisierung der Produkte zur Folge haben. Dies wird dadurch verdeutlicht, dass die hohe Qualität eines Produktes als selbstverständlich vorausgesetzt wird, wobei der Trend weg vom Massenprodukt hin zum individuellen Produkt geht. Hierfür sind etablierte Herstellungsprozesse nicht immer geeignet (HOFFMANN ET AL. 2010). Auch ist in diesem Zusammenhang die hohe Dynamik der Prozesse zu nennen. Dabei werden durch diese aktuellen Marktentwicklungen produzierende Unternehmen verstärkt mit Randbedingungen hinsichtlich Zeit, Kosten und Konkurrenz sowie sich wandelnden Entwicklungsaufgaben konfrontiert (LINDEMANN & LANGER 2009). Daher wird es immer schwieriger, eine flexible Fertigung unter Berücksichtigung von Kundenwünschen sowie unter technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sicherzustellen. Eine mögliche Lösung hierfür stellt die Anwendung von schichtweise arbeitenden, sogenannten generativen Fertigungsverfahren dar (GEBHARDT 2007). Durch Eigenschaften wie eine werkzeuglose Fertigung oder das Potenzial, nahezu beliebige Geometrien unabhängig vom Grad der jeweiligen Komplexität zu fertigen, wird die Relevanz generativer Fertigungsverfahren, auch durch den beginnenden Einsatz für Serienanwendungen, zukünftig stark zunehmen (WITT 2006).

Die generative Fertigung hat sich seit Anfang der 1990er-Jahre in den unterschiedlichsten Bereichen der Produktionstechnik etabliert. War es zu Beginn noch „exotisch“ und aufsehenerregend, innerhalb der Produktentwicklung schichtweise gefertigte Bauteile als Modelle einzusetzen, das sogenannte Rapid Prototyping, so entspricht es heute dem Standard, Produkteigenschaften auf diese Weise frühzeitig und anschaulich zu überprüfen. Dabei besitzen schichtweise arbeitende Fertigungsverfahren vor allem das Potenzial, Bauteile direkt, d. h.

ohne weitere Programmierschritte aus CAD-Daten aufzubauen. Hierdurch ist die aufwandsarme, kostengünstige und werkzeuglose Herstellung auch komplexer Bauteile in einem Prozessschritt möglich. Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren verändern sich die Kosten nicht in Abhängigkeit der Komplexität (ZÄH ET AL. 2006). Es kann so ein Kosten- wie auch ein Zeitvorteil gegenüber bisher genutzten Technologien durch den Einsatz generativer Verfahren erreicht werden. REITHOFER (2010) beschreibt im Rahmen eines Vortrags das Potenzial dieser Verfahren, Investitionen bspw. für Variantenwerkzeuge und Produktionsanlagen zu reduzieren. Insbesondere eignen sie sich, um komplexe Bauteile bzw. Bestandteile eines Bauteils wirtschaftlich herzustellen. Hierbei sind beispielhaft ein Bauteil mit Gitterstrukturen, Formeinsätze mit angepassten Kühlkanälen oder Dentalimplantate zu nennen (siehe Abbildung 1).



Quelle: Arcam



Quelle: Trumpf



Quelle: MTT Technologies

Abbildung 1: Bauteil mit Gitterstruktur (links, ARCAM 2011A), Formeinsatz mit angepasstem Kühlkanal (Mitte, BUCHFINK & LEIBINGER-KAMMÜLLER 2006), Dentalimplantat (rechts, MTT TECHNOLOGIES 2011)

Neben der Fertigung von Modellen aus Kunststoff im Rapid Prototyping (RP) etablierte sich zunehmend auch der Einsatz metallischer Werkstoffe bei generativen Verfahren zur schnellen Produktion von Werkzeugen (Rapid Tooling; RT). Die weitere Entwicklung wurde durch die direkte Herstellung von individualisierten Einzelteilen oder Kleinserien aus Metall und Kunststoff (Rapid Manufacturing; RM) bestimmt. Insbesondere die Potenziale und der zunehmende technologische Fortschritt der Rapid-Technologien bewirken einen solchen Trend. Dieser spiegelt sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, auch in den Verkaufszahlen generativ arbeitender Anlagen wider. Diese sind ein Indikator für die zunehmende Relevanz generativer Fertigung in der Produktionstechnik.

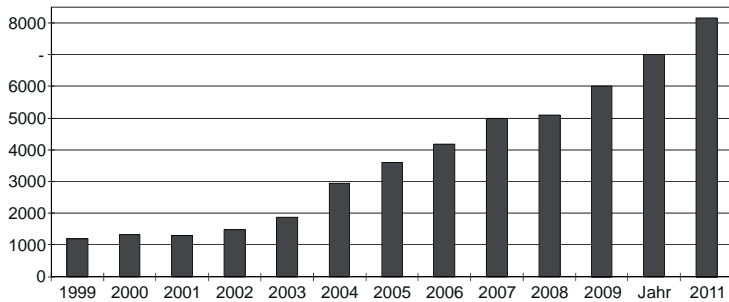


Abbildung 2: Anzahl verkaufter Anlagen für die generative Fertigung (NACH WOHLERS 2010)

WOHLERS (2010) unterstreicht dies, wie in Abbildung 3 dargestellt, indem er die zukünftige Entwicklung für die kundenspezifische Produktion und die Kleinserienfertigung unter der Annahme einer baldigen Integration der generativen Fertigungsverfahren in die industrielle Fertigungsumgebung antizipiert. Dabei führt er aus: „Rapid-Manufacturing-Anwendungen wachsen [...] Mit der steigenden Anzahl an Anwendungen wird die Entwicklung neuer Systeme stattfinden, welche schneller sind und höhere Produktionsvolumina erreichen können [...]“

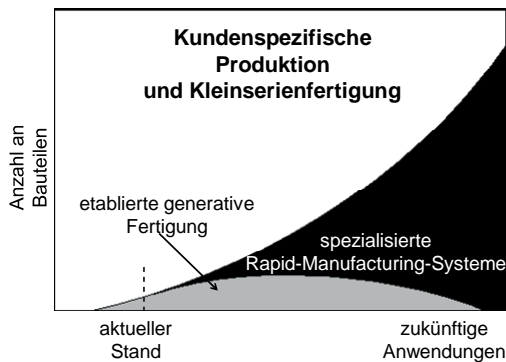


Abbildung 3: Zukünftige Entwicklung der kundenspezifischen Produktion und der Kleinserienfertigung (WOHLERS 2010)

Daher wird zukünftig die Anzahl generativ gefertigter Bauteile innerhalb der kundenindividuellen Fertigung stark zunehmen. Hierfür ist die schnelle und optimierte Fertigung ausschlaggebend. Für etablierte Systeme zur generativen Bauteilherstellung mithilfe des Laserstrahls wird es zukünftig immer schwieriger,

die steigenden Anforderungen an die schichtweise Fertigung komplett zu erfüllen. Ein möglicher Ansatz für die Herstellung hochwertiger metallischer Bauteile ist, wie im Folgenden beschrieben, die Anwendung des Elektronenstrahls als Energiequelle bei der schichtweisen Verarbeitung metallischer Pulversysteme.

1.2 Motivation der Arbeit

1.2.1 Das generative Verfahrensprinzip

Im Gegensatz zu konventionellen bzw. etablierten Fertigungsverfahren erzeugen generative Fertigungsverfahren physische Gegenstände durch inkrementelles, meist schichtweises Hinzufügen von Material (MÜLLER & MÜLLER 2002). Dabei wird ein Ausgangsmaterial durch das lokale Einbringen von Energie Schicht für Schicht verfestigt und eine Verbindung der Schichten untereinander hergestellt. Es können flüssige, pulverförmige oder feste Werkstoffe genutzt werden (ZÄH ET AL. 2006). Als Basis dient immer eine 3D-CAD-Datei mit den Informationen über die Bauteilgestalt und seine Begrenzungen. Dieses Prinzip unterscheidet sich daher von den bekannten Verfahrensgruppen wie Urformen, Umformen, Trennen oder Fügen. Neben generativen Fertigungsverfahren (VDI 3404 2009) sind weitere gebräuchliche Bezeichnungen dieser Verfahren bspw. der Begriff „schichtweise Fertigung“ oder „additive Fertigung“ (ZÄH ET AL. 2006, VDI 3505 2012). Im anglo-amerikanischen Sprachraum haben sich zudem noch die Bezeichnungen Layer Manufacturing (LM) oder Additive Layer Manufacturing (ALM) etabliert (GRIMM 2004). In Abbildung 4 wird die grundlegende Prozesskette exemplarisch dargestellt.

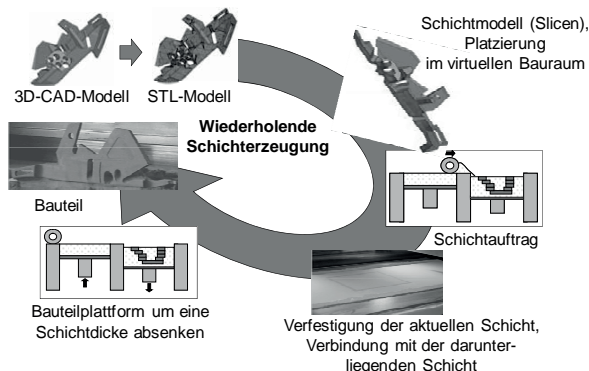


Abbildung 4: Prozesskette der generativen Bauteilherstellung (MEINDL 2005)

Im ersten Prozessschritt, der Triangulation, findet zunächst eine Annäherung aller Oberflächen des als Ausgangsbasis dienenden CAD-Volumenmodells durch Dreiecke statt. Der Datensatz wird hierbei in eine plattformneutrale STL-Datei zur Bauteilbeschreibung überführt. Diese Datei stellt den Ausgangspunkt für den *Slice*-Prozess dar. Hier wird das Modell in einzelne Schichten zerlegt und die jeweiligen Geometrieinformationen für den Bauprozess werden erstellt. In der anschließenden Bauprozessvorbereitung werden die STL-Datensätze virtuell im Bauraum der Maschine platziert. Das Anbringen von notwendigen Stützkonstruktionen bei Überhängen und Hinterschnidungen des Bauteils findet ebenfalls hier statt. Auch werden Prozessparameter wie die Ablenkgeschwindigkeiten während des Bauprozesses oder die Bauraumtemperatur festgelegt. Das Aufbringen der Werkstoffschichten wird durch einen anlagenspezifischen Mechanismus vorgenommen. Das selektive Verbinden der Werkstoffschichten bzw. der jeweiligen Bereiche führt meist eine punktförmige Energiequelle durch. Anschließend senkt sich die Bauplatte mit dem bereits gebauten Anteil um eine Schichtstärke ab. Bevor der nächste Querschnitt verfestigt wird, muss eine neue Werkstoffschicht aufgetragen werden. Diese Schritte wiederholen sich bis zur Fertigstellung des Bauteils. Abschließend kann dieses entnommen werden. Je nach Verfahrensprinzip können sich noch verschiedene Nachbearbeitungsschritte anschließen.

1.2.2 Entwicklung, Abgrenzung und kommerzieller Einsatz generativer Fertigungsverfahren

Da die generativen Verfahren im Vergleich zu konventionellen Fertigungstechnologien neue Fertigungsprinzipien darstellen, gestaltet sich die Zuordnung in eine Untergruppe der DIN 8580 (2003) für Fertigungsverfahren schwierig. Ein bestehender Ansatz ist hierbei die Einordnung als urformende Verfahren, da die Verfahrensgruppendifinition „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen eines Zusammenhaltes“ (DIN 8580 2003) am ehesten dem vorgestellten Verfahrensablauf entspricht (FICHTNER 2009). Hier ist allerdings die Definition neuer Untergruppen zur Unterscheidung der Verfahren nötig, um den einheitlichen Sprachgebrauch und eine klare Differenzierung der Verfahren zu ermöglichen.

Ferner hat sich die Einteilung nach den verschiedenen Verfahrensprinzipien als eine gebräuchliche Methode erwiesen. In Tabelle 1 sind die fünf grundlegenden Verfahrensprinzipien mit jeweils einem Beispiel aufgeführt (ZÄH ET AL. 2006).

1.2 Motivation der Arbeit

Verfahrensgruppe	Prinzip	Beispiel
UV-Aushärtung	Lokal induzierte Copolymerisation	Stereolithographie (SLA)
Sintern/ Schmelzen	Lokales Aufschmelzen von Pulverwerkstoffen	Selektives Lasersintern (SLS)
Laminieren	Ausschneiden und Fügen von Platten	Laminated Object Manufacturing (LOM)
Extrudieren	Aufbringen von geschmolzenen Polymeren mittels Düsen	Fused Deposition Modelling (FDM)
Bindertechnologie	Einbringen von Bindemitteln in das Pulverbett	3D-Printing

Tabelle 1: Fünf grundlegende Verfahrensprinzipien der generativen Fertigung (ZÄH ET AL. 2006)

Das Prinzip der schichtweisen Herstellung von Bauteilen wurde erstmals von Blanter beschrieben. In seiner 1892 veröffentlichten Patentschrift (SCHUTZRECHT US473901A 1892) schlägt er die Herstellung von dreidimensionalen topografischen Karten durch das Ausschneiden und Verkleben von Wachsplatten vor. Dieser Ablauf stellt auch heute noch die Grundlage für verschiedene Fertigungsverfahren dar. Beispielhaft sind hierfür die Verfahren *Laminated Object Manufacturing* (LOM; SEIDEL 2007) oder *Metal Laminated Tooling* (MELATO; TECHEL ET AL. 2004) zu nennen.

Ferner berichtet u. a. Swainson im SCHUTZRECHT US4041476A (1977) über die lokale Aushärtung eines fotoreaktiven Polymers für die Bauteilherstellung. Bei dem von ihm dargelegten Prozessablauf wird die Aushärtungsreaktion in einem Kreuzungspunkt zweier überlagerter Laserstrahlen ausgelöst. Da für die Positionsveränderung des Kreuzungspunktes die beiden Laser bewegt werden und die Bauplattform fixiert ist, kann nur eingeschränkt von einem schichtweise arbeitenden Verfahren gesprochen werden (ZÄH ET AL. 2006). Ein auf dem Prinzip des lokalen Aushärtens eines Polymers basierendes Fertigungssystem wurde erstmals 1988 von der Firma 3D Systems angeboten und verkauft (BEAMAN 2001). Auf einer in z-Richtung beweglichen Bauplattform werden die Bauteilquerschnitte selektiv belichtet und untereinander verbunden. Die steigende Leistungsfähigkeit von Computersystemen ermöglichte zudem die direkte Umsetzung von 3D-CAD-Daten eines Volumenmodells in eine Bauteilherstellung.

Das selektive Verfestigen von pulverförmigen Werkstoffen mittels fokussierter Laserstrahlung zur Erzeugung komplexer Bauteile stellte Deckard im SCHUTZ-

RECHT US4863538A (1989) vor. Zunächst beschränkten sich die Werkstoffe auf thermoplastische Kunststoffe, wobei in der Folge auch metallische und keramische Werkstoffe (GRIMM 2004) genutzt wurden. Anlagen dieses Verfahrensprinzips werden von verschiedenen Herstellern vertrieben, wobei sich die Namensgebungen u. a. aus patentrechtlichen Gründen oder zur Abgrenzung von Wettbewerbern sehr stark unterscheiden. Das selektive Verfestigen von Pulverwerkstoffen wird je nach Hersteller z. B. als Direktes Metall-Lasersintern (DMLS) – Fa. EOS GmbH (STOTKO 2005), LaserCusing – Fa. ConceptLaser GmbH (EDELMAHN 2005) oder Selective Laser Melting (SLM) – Fa. SLM Solutions GmbH (EISEN & WITT 2007) bezeichnet. Gleich ist bei allen genannten Verfahren der Einsatz eines Laserstrahls als Energiequelle zum lokalen Aufschmelzen der Pulverwerkstoffe. Jedoch wiesen die Verfahren zu Beginn u. a. oftmals noch große Unzulänglichkeiten hinsichtlich der Dichte des erzeugten Gefüges, der Eigenspannungen oder der Baugeschwindigkeit auf (GEBHARDT 2007). Teilweise konnten diese durch zielgerichtete Optimierungen überwunden werden. Einen weiteren deutlichen Fortschritt ermöglichte der Einsatz des Elektronenstrahls als neuartige Energiequelle. Durch die deutlich höhere Leistungsdichte, d. h. die Strahlleistung bezogen auf die Fläche des Strahlfokus, oder die Potenziale einer schnellen und flexiblen Strahlablenkung mittels elektromagnetischer Spulen kann das Spektrum möglicher metallischer Legierungen erweitert und es können die Prozesszeiten reduziert werden. Diesen Einsatz der Elektronenstrahltechnologie als neuartige Energiequelle zum selektiven Verfestigen eines metallischen Pulvers beschreibt Larson im SCHUTZRECHT WO1994026446A1 (1994). Daraus ging im Jahr 1997 das Unternehmen ARCAM hervor, das gegenwärtig die elektronenstrahlbasierten Anlagen EBM S12 und A2 zum Electron Beam Melting (EBM) vertreibt (ARCAM 2011b). Diese werden in Forschungsinstitutionen für die Verfahrensentwicklung, aber auch bereits in Bereichen der Luft- und Raumfahrt (GOOD 2007) sowie der Medizintechnik (HEINL ET AL. 2007) eingesetzt.

1.2.3 Potenziale generativer Fertigungsverfahren

Durch das Potenzial generativer Fertigungsverfahren, Bauteile direkt aus CAD-Daten aufzubauen, ist eine aufwandsarme und kostengünstige Herstellung auch komplexer Bauteile mittels einer werkzeuglosen Fertigung in einem Prozessschritt möglich. In Abbildung 5 ist nach SIGL (2003) zu erkennen, dass konventionelle Verfahren zwar bei einfachen Bauteilen Kostenvorteile haben, die Kosten bei generativen Verfahren aber auch bei steigender Komplexität näherungsweise konstant bleiben.

1.2 Motivation der Arbeit

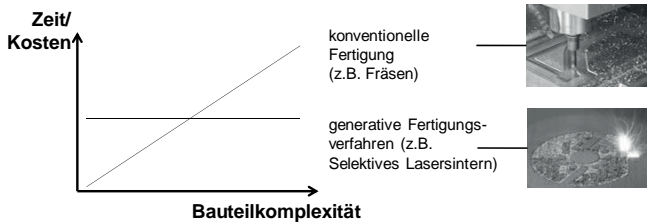


Abbildung 5: Vergleich der Herstellkosten in Abhängigkeit von der Bauteilkomplexität (SIGL 2003)

Auch können durch die geometrischen Freiheiten bei den generativen Fertigungsverfahren Bauteilfunktionen realisiert werden, die bei konventionellen Fertigungsverfahren nicht bzw. nur mit einem extrem hohen Aufwand erreichbar sind. Beispielsweise ist es möglich, Überhänge und komplexe innere Strukturen in Bauteilen vorzusehen. Als einzige geometrische Restriktion ist die Entfernbarkeit des nicht verfestigten Werkstoffs aus den Hohlräumen sowie der ggf. erforderlichen Stützstrukturen zu beachten (GRIMM 2004). So sind, wie in Abbildung 6 links dargestellt, Baugruppen in einem Schritt, also ohne Montage, aber mit Gelenken und Bewegungsfunktionen verwirklicht (STOTKO 2005). Eine weitere erreichbare Funktion ist die Integration von konturnahen Kühlkanälen bei Formeinsätzen (siehe Abbildung 6 rechts) (EDELMAHN 2005). Durch die angepasste Formgebung kann die Wärmeenergie deutlich schneller als bei geraden Kühlmittelbohrungen aus den Bauteilen abgeführt werden. Hieraus ergibt sich eine Verringerung der Zykluszeiten bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen mittels Spritzgießen.

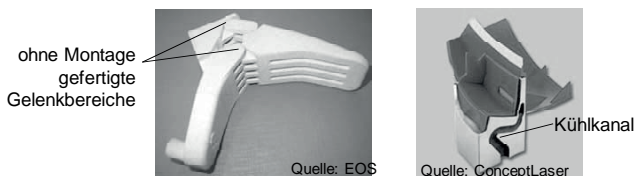


Abbildung 6: Integration von Gelenken in ein Bauteil (links) und konturnaher Kühlkanal (rechts)

1.2.4 Metallische Werkstoffe in der generativen Fertigung

Die Verfahrensentwicklung des selektiven Verfestigens pulverförmiger Werkstoffe startete, wie beschrieben, Ende der 1980er-Jahre mit der Konzeption einer

Anlage zum lokalen Aufschmelzen von Kunststoffen mittels eines Lasers, dem sogenannten *Selective Laser Sintering* (SLS) (DECKARD 1989). Seither erfolgte die Qualifikation unterschiedlicher Pulvermaterialien für die generative Bauteilherstellung. Unter anderem gelang es, Bauteile aus weiteren Kunststoffen (GEBHARDT 2007), metallischen Legierungen (ZÄH ET AL. 2006) oder auch keramischen Werkstoffen (KLOCKE & ADER 2003) in den verschiedenen Anlagentypen zu fertigen.

Insbesondere entstanden bereits kurz nach der Qualifikation von pulverförmigen Kunststoffen für das selektive Verfestigen Bestrebungen, auch *metallische Pulver* zu komplexen Bauteilen generativ aufzubauen. Jedoch konnten z. B. stahlbasierte Pulver aufgrund der in der damaligen Anlagentechnik geringen Laserleistungen nicht direkt verfestigt werden und wiesen daher eine begrenzte Bauteilfestigkeit auf. Um diesen Nachteil auszugleichen, wurde als ein Lösungsansatz ein niedrigschmelzender Legierungsanteil in das Pulver integriert, welcher den primären Werkstoffzusammenhalt sicherstellt (NIEBLING 2005). Eine weitere Verfahrensmöglichkeit ist der Einsatz eines kunststoffummantelten Metallpulvers, wobei erst in einem zweiten Schritt, dem Ofenprozess, der metallische Zusammenhalt der Pulverpartikel geschaffen und die entstehende Metallmatrix mit Bronze infiltriert wird (SEEFRIED 2005).

In der Folge gelang es u. a. durch steigende Laserleistungen, auch Pulver verschiedener Legierungen direkt, d. h. ohne zusätzlichen Werkstoff oder zweiten Prozessschritt, zu verfestigen. Aktuell sind für laserstrahlbasierte Verfahren Werkstoffe aus unterschiedlichsten Gruppen verfügbar. Bei der Anwendung dominieren insbesondere verschiedene Stähle. Da die jeweiligen Hersteller die Legierungen meist mit individuellen Marktnamen versehen, ist ein direkter Vergleich nur sehr begrenzt möglich.

1.2.5 Einfluss von Scanstrategien auf die generative Fertigung

Scanstrategien beeinflussen als wesentliches Merkmal die Qualität der herzustellenden Bauteile bei der schichtweisen Fertigung mit einer punktförmigen Energiequelle (MERCCELIS & KRUTH 2006). Beim selektiven Verfestigen pulverförmiger Werkstoffe mittels Laser- oder Elektronenstrahlen müssen diese Aspekte berücksichtigt werden. Gemeinsam mit Strahlparametern wie der Leistung oder der Fokusslage haben daher die durch die Ablenkssysteme generierte geometrische Anordnung und der zeitliche Ablauf der Strahlableitwege einen entscheidenden Einfluss auf die Bauteilqualität. In Abbildung 7 ist hierzu die geometrische Abfolge grundlegender Scanstrategien aufgezeigt. Neben der Bauteilkontur ist die

Füllung der Fläche mit angepassten Mustern, sogenannten *Hatches*, relevant. Beispielhaft ist hier der aktuelle Stand der Scanstrategien bzw. -muster von am Markt erhältlichen laserstrahlbasierten Anlagensystemen dargestellt, insbesondere der *x-Hatch*, der *y-Hatch*, der *xy-Hatch* und die Unterteilung in Schachbrettmuster. Aufgrund der zur Ablenkung des Laserstrahls genutzten Spiegelgalvanometer ergeben sich für Verfahren mit dieser Energiequelle Restriktionen hinsichtlich der Ablenkgeschwindigkeit und -genauigkeit, sodass für Flächen im jeweiligen Querschnitt nahezu ausschließlich lineare und parallele Ablenklinien eingesetzt werden.

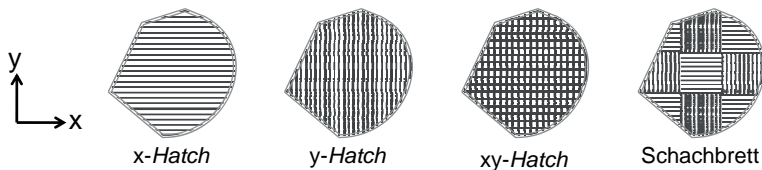


Abbildung 7: Scanstrategien in der generativen laserstrahlbasierten Fertigung zur selektiven Verfestigung pulverförmiger Werkstoffe

Der durch die Scanstrategie festgelegte zeitliche und geometrische Ablauf beim Eintrag der Strahlleistung in das Pulverbett zum Aufschmelzen des Werkstoffs verursacht thermisch induzierte Eigenspannungen in der jeweiligen Bauteilschicht (MERCCELIS & KRUTH 2006). Diese Eigenspannungen haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Strukturverhalten des gesamten Bauteils. Weitere augenscheinliche Qualitäts- und Prozessaspekte, welche durch die Scanstrategie beeinflusst werden, sind bspw. die Delamination, d. h. eine ungenügende Verbindung von Bauteilschichten untereinander, oder die Porenbildung auf der Schichtoberfläche und im Gefüge (ZAEH & KAHNERT 2009). Beide Effekte sind z. B. auf nicht an die Prozess- und Werkstoffanforderungen angepasste Temperaturen im Schmelzbadbereich zurückzuführen. Bei der Delamination reichen die Temperatur und die Energie nicht aus, um auch die darunterliegende Schicht an deren Oberfläche anzuschmelzen und mit der obersten Schicht zu verbinden. Porenbildung kann u. a. durch das nicht vollständige Aufschmelzen des Pulverwerkstoffes oder aber durch einen zu hohen Energieeintrag und eine infolgedessen zu hohe Prozesstemperatur verursacht werden (LUTZMANN 2011). Bei einer zu hohen Temperatur der Schmelze zieht diese sich aufgrund der Oberflächenspannung zusammen. Es entstehen freie Bereiche in der Werkstoffschicht, die auch nicht durch die darauf folgenden Schichten aufgefüllt werden. Die Temperatur wird durch die Strahlleistung sowie die zeitliche und geometrische Abfolge

des Energieeintrags, d. h. die Scanstrategie, maßgeblich beeinflusst. Dies verdeutlicht die Relevanz eines zeitlichen wie auch geometrisch optimierten Energieeintrags in die Pulverschicht für das Prozessergebnis. Dabei hängen die Eigenschaften und die erreichbaren Ablenkgeschwindigkeiten, Scanmuster und Richtungsänderungen stark von der jeweiligen Energiequelle und dem zugehörigen Ablenkssystem ab. Scanstrategien stellen daher ein zentrales Element des generativen Fertigungsprozesses dar.

In diesem Zusammenhang bietet die Elektronenstrahlablenkung mittels elektromagnetischer Spulen die notwendige Flexibilität, um auch komplexe Strahlablenkwege umzusetzen. Es ergibt sich somit ein hohes Maß an Freiheit für die Einbindung innovativer Scanstrategien und hoher Ablenkgeschwindigkeiten zur Optimierung der Prozessführung.

1.3 Zusammenfassung

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, erfüllen generative Fertigungsverfahren im Allgemeinen die Anforderung, auch komplexe Bauteile direkt und mit wenig Aufwand zu fertigen. Für hoch belastbare Bauteile erforderliche Kriterien, wie mechanische Festigkeiten, lassen sich in der generativen Fertigung nahezu ausschließlich durch den Einsatz von Metall erreichen. Daher verhilft u. a. eine hohe Baugeschwindigkeit, z. B. durch eine hohe Ablenkgeschwindigkeit oder eine hohe Leistungsdichte, zu einem wirtschaftlichen Einsatz dieser Verfahren. Jedoch sind insbesondere bei der Herstellung metallischer Werkstücke aktuell noch verschiedenste Restriktionen zu beachten.

Die selektive Verfestigung mittels laserstrahlbasierter Verfahren ist oftmals auf den Einsatz von Legierungen, welche eine geringe Energie zum Aufschmelzen des Werkstoffs benötigen, beschränkt. Ebenso können mit dieser Energiequelle wegen der prozessbedingten Wechselwirkungen im Bereich des aufgeschmolzenen Werkstoffs im Vergleich zum Elektronenstrahl nur sehr begrenzt reaktive pulverförmige metallische Werkstoffe genutzt werden. Zudem bestehen aufgrund des physikalischen Aufbaus des Lasers und der zugehörigen Strahlablenkung mittels massebehafteter Spiegel-Scanner-Systeme für generative Fertigungsverfahren Einschränkungen hinsichtlich erreichbarer Ablenkgeschwindigkeiten und der Flexibilität in der Applizierung von Scanstrategien. Abbildung 8 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Energiequellen Laser- und Elektronenstrahl hinsichtlich verschiedener für die generative Fertigung relevanter Bewertungskriterien.

1.3 Zusammenfassung

Allgemein wurden bereits verschiedenste Ansätze und Systeme für die generative Fertigung metallischer Bauteile entwickelt; jedoch konnten diese bis jetzt noch nicht für einen breiteren Einsatz in der produzierenden Industrie qualifiziert werden. Restriktionen wie unzureichende Baugeschwindigkeiten, nicht geeignete Gefügeeigenschaften oder unzulängliche mechanische Kennwerte verhindern die umfangreichere Anwendung. Es gibt bereits verschiedene Ansätze, um dies auszugleichen: zum einen der Einsatz des Elektronenstrahls als Energiequelle, zum anderen die Optimierung von zu unzureichenden Bauteilqualitäten führenden, ursprünglich für die laserstrahlbasierte generative Fertigung mit Spiegelgalvanometern entwickelten Scanstrategien.

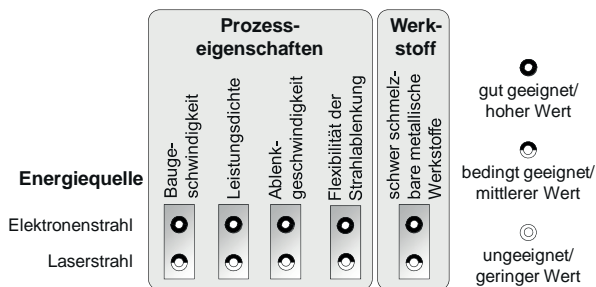


Abbildung 8: Übersicht der durch die Energiequellen bedingten Prozesseigenschaften und der anwendbaren Werkstoffgruppen

Es ist ersichtlich, dass der Elektronenstrahl ein hohes Potenzial besitzt, metallische Pulverwerkstoffe prozesssicher aufzuschmelzen. Bei weiteren Prozessparametern und -eigenschaften wie der Leistungsdichte, der Ablenk- oder der Baugeschwindigkeit können für die generative Fertigung beim Einsatz des Elektronenstrahls die höchsten Werte erzielt werden. Daneben erlaubt die Ablenkung mittels elektromagnetischer Spulen auch flexible Muster und Scanstrategien, die beim Laserstrahl aufgrund der Massenträgheit der Spiegelgalvanometer nicht realisierbar sind. Somit lassen sich durch den Einsatz des Elektronenstrahls die noch vorherrschenden Beschränkungen überwinden.

Trotzdem gibt es bis jetzt noch keine Bestrebungen, die Freiheit zur Implementierung neuer und flexibler Scanstrategien, welche die Elektronenstrahlablenkung ermöglicht, zu nutzen. Um das Anwendungsfeld für generativ gefertigte metallische Bauteile zu erweitern, soll im Rahmen dieser Arbeit deren Herstellung mit dem Elektronenstrahl qualifiziert sowie die Applikation von innovativen Scanstrategien umgesetzt werden.

1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

1.4.1 Allgemeines

Wie einleitend erläutert, wird durch eine steigende Individualisierung und die damit einhergehenden niedrigen Stückzahlen einer Produktvariante das Rapid Manufacturing (RM) als Fertigungsstrategie weiter an Bedeutung gewinnen. Für die direkte Herstellung eines metallischen Bauteils bedeutet dies, die gewünschten Strukturen von Anfang an mit den späteren Serienwerkstoffen und den geforderten Werkstoffkennwerten herzustellen. Zu denjenigen generativen Fertigungsverfahren, welche das höchste Potenzial im Bereich der direkten Fertigung metallischer Bauteile bieten, zählt das selektive Verfestigen metallischer Pulverwerkstoffe mittels des Elektronenstrahls. Jedoch wird dieses Verfahren nur in Nischenbereichen (z. B. Medizintechnik, Rennsport usw.) mit spezifisch ausgelegten Fertigungsanlagen genutzt. In den folgenden Abschnitten werden darauf basierend eine Zielsetzung (Abschnitt 1.4.2) sowie die Vorgehensweise und die Struktur der Arbeit (Abschnitt 1.4.3) abgeleitet.

1.4.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, den Elektronenstrahl sowie die mit dem Elektronenstrahlablensystem möglichen neuartigen Scanstrategien für die generative Fertigung zu qualifizieren. Dadurch soll eine Verbesserung gegenüber bestehenden, meist laserstrahlbasierten generativen Fertigungsverfahren hinsichtlich der Bauteilgüte und der Baugeschwindigkeit erzielt werden. Im Weiteren wird angestrebt, die Potenziale des Elektronenstrahls für eine zielgerichtete Auswahl und Verarbeitung von (Serien-)Werkstoffen zu nutzen. Mit diesen Maßnahmen sollen die Produktivität und die Qualität in der generativen Fertigung metallischer Bauteile gesteigert werden. Der Elektronenstrahl soll als flexibles Werkzeug und Energiequelle in der generativen Fertigung etabliert werden.

Zusammengefasst ist beabsichtigt, folgende Inhalte im Rahmen der Untersuchungen zu erarbeiten und umzusetzen:

- Qualifikation einer kommerziellen Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für die generative Fertigung
- Definition einer Methode zur Beschreibung, Bewertung und Auswahl unterschiedlicher Scanstrategien

- Qualifikation unterschiedlicher Scanstrategien sowie deren Implementierung in der vorhandenen Steuerung der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage, um
 - die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen,
 - Werkstoffe gezielt auswählen zu können,
 - die Produktivität und Qualität generativer Fertigungsverfahren zu erhöhen und
 - den Elektronenstrahl für die generative Fertigung in der Produktionstechnik etablieren zu können.

1.4.3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Zielsetzung betrifft die Implementierung und Analyse von Scanstrategien direkt sowie die Neukonfiguration der Anlagentechnik indirekt. Dabei können bei der Weiterentwicklung und Optimierung von Fertigungsverfahren verschiedenste Methoden eingesetzt werden. MEINDL (2005) erläuterte hierfür bei generativen Fertigungsverfahren den exemplarischen Einsatz verschiedener Entwicklungsmethoden. Je nach Entwicklungsstufe des Verfahrens wurden z. B. die Finite-Elemente-Methode (FEM) oder das *Design of Experiments* (DoE) vorgeschlagen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Entwicklungsmethoden nur jeweils einen Teilaspekt des jeweiligen Entwicklungsziels behandeln.

Da die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete übergeordnete Zielsetzung einer Qualifikation des Elektronenstrahls für die generative Fertigung, wie beschrieben, mehrere Teilaspekte wie die Modifikation einer Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und die Entwicklung einer Methodik zur Beschreibung von Scanstrategien inkl. einer Verfahrensweise zu deren Optimierung enthält, kann kein nur singuläre Aspekte betrachtendes Vorgehen genutzt werden. Stattdessen ist es essenziell, die verschiedenen Themen in einer übergreifenden Vorgehensweise zu integrieren. Ein effektives Verfahren hierzu ist der Problemlösungszyklus nach EHRENSPIEL (2003). Hierdurch können Methoden im Rahmen der Arbeit je nach Zeitpunkt zielgerichtet in die Entwicklung integriert und es kann ein Vorgehen zur Entwicklung und Analyse von Scanstrategien abgeleitet werden. Ferner ist die Selbstständigkeit der Vorgehensweise für die durchzuführenden Untersuchungen des Elektronenstrahlschmelzens vorteilhaft. Es soll also möglich sein, diese Untersuchungen auch auf die notwendigen Teilaspekte innerhalb der Bearbeitung anzuwenden.

In den folgenden Absätzen werden das Handlungsmuster des Problemlösungszyklus sowie die Inhalte und das Vorgehen für die drei Hauptschritte kurz umrissen.

Ziel klären

In der Phase *Ziel klären* sollen zunächst die Voraussetzungen für die Bearbeitung der Entwicklungsaufgabe geschaffen werden. Der Inhalt ist die Analyse, die Formulierung und die Strukturierung der Aufgabe. Hierbei erfolgt aus einer systematischen Ermittlung der Entwicklungspotenziale bestehender Lösungen die Definition der Zielsetzung. Wesentlich ist dabei, dass sowohl die Ausgangssituation als auch alle relevanten Ziele sowie Anforderungen abgeleitet und erfasst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist diese Phase von grundlegender Bedeutung. Ausgehend vom Stand der Technik werden zunächst die Randbedingungen sowie bestimmende Einflussfaktoren des Prozesses erfasst. Weiterhin wird die Zielsetzung anhand konkreter Anforderungen ausgeführt. Zu berücksichtigen sind sowohl Aspekte für die Entwicklung neuer Scanstrategien als auch die dabei notwendigen Modifikationen an der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage.

Lösung suchen

Der Teilschritt *Lösung suchen* beinhaltet zunächst die Suche nach vorhandenen Lösungen, soweit diese auf die Problemstellung anwendbar sind. Im Weiteren können neue Ansätze mittels verschiedenster Kreativitätsmethoden generiert und angepasst werden. Durch das abschließende Systematisieren der Ergebnisse wird eine Synthese der ermittelten Ansätze erreicht.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen bedeutet dies für die Modifikation der Anlagentechnik das Ableiten von Teilaspekten und die Darstellung einer entsprechenden Vorgehensweise. Für die Scanstrategien muss eine Methode zur Beschreibung existierender Ansätze und zum Ableiten neuer, bisher noch nicht bekannter Lösungen gefunden werden.

Lösungsalternative auswählen bzw. verwirklichen

Abschließend werden im Rahmen des Teilschritts *Lösung auswählen bzw. verwirklichen* die im vorigen Teilschritt gefundenen Lösungen analysiert, bewertet und die beste Alternative ausgewählt. Dazu müssen die Eigenschaften der Lösungen über geeignete Vorgehensweisen ermittelt werden. Durch deren Vergleich mit der Anforderungsliste bzw. dem Zielsystem werden die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Varianten deutlich. Auf deren Basis erfolgt die Festlegung einer adäquaten Lösung.

1.4 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wird dieser Schritt auf verschiedenen Ebenen durchgeführt. Erweiterungen und Änderungen der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage betreffen den mechanischen und den steuerungstechnischen Aufbau. Für die Entwicklung von Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen wird die Definition einer Vorgehensweise zur systematischen softwarebasierten Erzeugung vieler verschiedener Lösungen inklusive deren methodischer Bewertung erarbeitet.

Die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellte Vorgehensweise spiegelt sich auch in der Struktur der Arbeit wider (vgl. Abbildung 9). Für die Phase „Ziel klären“ wurden im Rahmen der Einleitung (Kapitel 1) die Motivation, die Zielsetzung und die zugehörige Vorgehensweise erläutert. Zudem findet im Rahmen dieser Phase in Kapitel 2 eine Erläuterung des Standes der Forschung und Technik statt. Das Erzeugen von Lösungsalternativen, in diesem Zusammenhang die Phase „Lösung suchen“, ist Bestandteil von Kapitel 3 zur Entwicklung und Umsetzung einer allgemeinen Beschreibungsmethodik für Scanstrategien. Neben der Entwicklung einer Vorgehensweise zur Beschreibung von Scanstrategien wird durch die Arbeiten zur Modifikation der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage die Basis geschaffen, um in Kapitel 4 zur Phase „Lösungsalternative auswählen und bewerten“ überzuleiten. Dieses Kapitel beinhaltet die Analyse und Bewertung von Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen. Die Beschreibung einer Anwendung und eine Betrachtung der Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens in Kapitel 5 gehen nochmals auf die erarbeiteten Inhalte ein. Die vorliegende Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick in Kapitel 6.



Abbildung 9: Struktur der vorliegenden Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Allgemeines

Nach der einführenden Beschreibung des generativen Verfahrensprinzips wird in diesem Kapitel der Stand der Forschung und der Technik des selektiven Verbindens metallischer pulverförmiger Werkstoffe, der zugehörigen Scanstrategien und des Elektronenstrahls als Energiequelle erläutert. Diese Inhalte bilden die Basis für die Untersuchungen zum Einsatz des Elektronenstrahls innerhalb der generativen Fertigung metallischer Bauteile.

Hierzu werden zunächst in Abschnitt 2.2 die Begrifflichkeiten zur Beschreibung einer Scanstrategie aus Veröffentlichungen abgeleitet und für den Einsatz im Rahmen dieser Arbeit definiert. In Abschnitt 2.3 wird der Ablauf des Verschmelzens von Pulverpartikeln charakterisiert. Abschnitt 2.4 hat die Bewertung des Aufbaus laser- und elektronenstrahlbasierter generativer Fertigungssysteme zum Inhalt. Wesentlich ist hierfür die Analyse von bereits umgesetzten Scanstrategien in Abschnitt 2.5. Die Abschnitte 2.6 und 2.7 behandeln die Eigenschaften der Energiequelle Elektronenstrahl bzw. deren Einsatz zum selektiven Verfestigen metallischer Pulverwerkstoffe. In Abschnitt 2.8 werden die Inhalte nochmals zusammengefasst und die Handlungsfelder in Bezug auf diese Arbeit erörtert.

2.2 Definitionen

2.2.1 Allgemeines

Vor allem bei generativen Verfahren, die mittels eines bewegten punktförmigen Fokuspunktes einer Energiequelle einen Werkstoff selektiv verfestigen und so eine Bauteilschicht herstellen, sind die Art und der zeitliche Ablauf der Bearbeitung der geometrischen Elemente entscheidend für die Qualität des Prozessergebnisses. Um die Energieeinbringung und deren Abhängigkeiten zu beschreiben, werden unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet. Sie wird je nach Quelle „Scanstrategie“ (BRANNER ET AL. 2006), „Belichtungsstrategie“ (EOS 2005) bzw. englisch „*Scanning Strategy*“ (XIE ET AL. 2005), „*Scanning Method*“ (YANG ET AL. 2002) oder „*Exposure Strategy*“ (MERCCELIS & KRUTH 2006) bezeichnet. Von der jeweiligen Bezeichnung ist oftmals der Ursprung ersichtlich. „*Scan Strategy*“ leitet sich vom Prinzip der Ablenkung eines Laserstrahls mit Spiegelgalvanometer-Scanner-Systemen her. Die Bezeichnung „Belichtungsstra-

2.2 Definitionen

ategie“ bzw. engl. „*Exposure Strategy*“ wird vor allem gebraucht, wenn der Werkstoff (Laser-)Licht ausgesetzt wird.

Da für das Elektronenstrahlschmelzen beschleunigte, massebehaftete Ladungsträger zur lokalen Erwärmung eingesetzt werden, sind hier Begriffe mit Bezug zur Lichtoptik nicht geeignet. Im Gegensatz zu Spiegelgalvanometer-Scanner-Systemen lenken beim Elektronenstrahlschmelzen elektromagnetische Spulen den geladenen Teilchenstrahl ab. Trotzdem ist es möglich und sinnvoll, von Scanstrategien zu sprechen. DOBENECK ET AL. (2001) beschreiben z. B. einen Elektronenstrahl, der die Schweißfuge scannt. Um eine Einheitlichkeit sicherzustellen, wird in dieser Arbeit somit der Begriff „Scanstrategien“ gebraucht. Mit Blick auf eine einheitliche Nutzung dieses Begriffs hat der nachfolgende Abschnitt 2.2.2 die Definition einer Scanstrategie für die schichtweise Verfestigung einer Pulverschicht zum Inhalt. In Abschnitt 2.2.3 werden im Sinne einer Übersicht die beschreibenden Parameter einer Scanstrategie erläutert.

2.2.2 Scanstrategie

Die Qualität mittels generativer Fertigungsverfahren hergestellter Bauteile wird durch unterschiedliche Prozessparameter und Einflussfaktoren bestimmt. Bei flüssigen oder pulverförmigen Werkstoffen stellen globale Eigenschaften wie die Art und der Aufbau der Energiequelle, die Werkstoffzusammensetzung oder die anlagenbedingte Einstellungen ein zentrales Element zur Prozessbeschreibung und -beurteilung dar. Wesentlich ist hierbei die Vorgehensweise zur definierten Energieeinbringung. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, werden verschiedene Bezeichnungen gebraucht. Abgesehen von den uneinheitlichen Begriffen existieren auch deutliche Unterschiede im Umfang und im Inhalt der jeweiligen Beschreibung. Meist wird die Spezifikation der Ablenkwege (Scanmuster) durch Richtung, Linienabstand und Winkel als der wesentliche Inhalt einer Scanstrategie angesehen. Dabei wird oftmals bei einer Aufteilung des Querschnitts in Teilbereiche zusätzlich auch die zeitliche Abfolge der jeweiligen Verfestigung mit berücksichtigt. Die häufig implizit mit einbezogenen erforderlichen Einstellungen der Energiequelle, wie Strahlleistung oder Fokusbildung, werden innerhalb dieser Arbeit entkoppelt von den Ablenkwegen betrachtet.

Da unter den oben genannten Teilaspekten zumeist Wechselwirkungen (ZAEH ET AL. 2007A) existieren, reicht für eine ganzheitliche Beschreibung der Scanstrategie die separate Festlegung der oben genannten Teilaspekte nur bedingt aus. Im Folgenden wird für die vorliegende Arbeit daher eine **Scanstrategie** definiert als:

Beschreibung der Verfestigung eines definierten Querschnitts in einer Schicht pulverförmigen Werkstoffs mittels einer bewegten (punktförmigen) Energiequelle unter Berücksichtigung von Ablenkwegen (Scanmuster) und Strahlparametern sowie der Zeit- und Richtungsabhängigkeit der Ablenkwege zur Erzeugung gewünschter Bauteil- und Gefügeeigenschaften.

Innerhalb der Scanstrategie ist das augenscheinlichste Merkmal das **Scanmuster** (engl. *scanning pattern*). Folgende Definition hat im Rahmen der Arbeit hierfür Gültigkeit:

Geometrische Beschreibung der Ablenkwege zur Verfestigung der Bauteilkontur (Outlining) und/oder des Bauteilquerschnitts (Hatch) mittels des (Elektronen-)Strahls; das Outlining ist dabei das konturparallele Abfahren der Außenlinie eines Bauteilquerschnitts mit dem Strahlfokus. Der Hatch ist das Muster, nach welchem die anlageneigene Energieführung den (Elektronen-)Strahl ablenkt, um den Bauteilquerschnitt zu verfestigen.

Für die Linien des *Outlinings* kann nur eine sehr begrenzte Anzahl an geometrischen Parametern variiert werden (siehe Abbildung 10), z. B. die Abstände vom Bauteilumriss sowie von weiteren *Outlining*- oder den *Hatch*-Linien. Die Beschreibung des *Hatches* beinhaltet darüber hinaus die Unterteilung in Teilbereiche und deren Füllung mit weiteren Mustern.

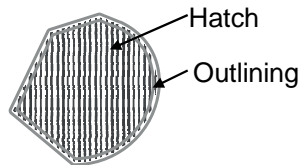


Abbildung 10: Aufbau eines Scanmusters

Als ein wichtiger Gesichtspunkt der Scanstrategie müssen auch die beschreibenden **Strahlparameter** der jeweiligen Energiequelle berücksichtigt werden. Durch diese wird vor allem der Prozess des Aufschmelzens und Verfestigens des Werkstoffs mit Größen wie der Schmelzbadgeometrie oder der Strahleindringtiefe bestimmt. Im Rahmen der Arbeit werden diese wie folgt definiert:

Gesamtheit aller beschreibenden Parameter und Ausprägungen der jeweiligen Energiequelle, die den Ablauf und das Prozessergebnis der selektiven Verfestigung maßgeblich beeinflussen.

2.2 Definitionen

Für das Elektronenstrahlschmelzen müssen insbesondere einstellbare Strahlparameter, wie bspw. Strahlstrom, Beschleunigungsspannung, Leistung, Fokuslage oder Ablenkgeschwindigkeiten, betrachtet werden. Diese und weitere Prozessparameter werden in Abschnitt 2.6 detailliert erläutert.

Der **Zeitverlauf und die Richtungsabhängigkeit** der Scanstrategie ist für das Elektronenstrahlschmelzen hinsichtlich der Materialtransporteffekte und des Abkühlverhaltens von Belang. Es bewirken u. a. lokale Schmelzbadströmungen einen Transport von Werkstoff hinter den Strahlauffreffpunkt, wobei bei nichtstetigen Richtungswechseln der Strahlablenkung, d. h. bei sprunghaften Änderungen des Geschwindigkeitsvektors, an den jeweiligen Stellen Werkstoff abgelagert wird (DANCE 2002). Neben dieser Abhängigkeit von der Strahlablenkrichung ergeben sich durch den zeitlichen Verlauf des Energieeintrags, z. B. als Ergebnis der Reihenfolge der Verfestigung verschiedener Teilbereiche des Querschnitts, transiente Effekte wie zeitabhängige Temperaturfelder oder Abkühlgradienten und somit Spannungszustände in der jeweiligen Schicht bzw. im jeweiligen Bauteil (BRANNER 2011).

Für die folgende Methodenentwicklung wird unter Zeit- und Richtungsabhängigkeit des Prozessergebnisses folgender Sachverhalt verstanden:

Abhängigkeit von der Reihenfolge der zu verfestigenden Teilbereiche bei einer Unterteilung in diese sowie die Richtung bzw. die Richtungsänderungen des Geschwindigkeitsvektors des bewegten Fokuspunktes.

2.2.3 Übersicht der Parameter einer Scanstrategie

Die folgende Abbildung 11 zeigt den Aufbau einer Scanstrategie mit den zugehörigen Parameter. Sie verdeutlicht nochmals deren grundlegenden Aufbau zur Beschreibung der geometrischen Größen sowie den Einfluss der Elektronenstrahlparameter als Kenngrößen der Energiequelle.

Das offensichtlichste Merkmal der Scanstrategie ist das Scanmuster, das sich durch die definierte Ablenkung des Strahlfokus ergibt. Hierbei sind vor allem das Ablenkmuster mit einer evtl. Unterteilung in Teilbereiche als Basis sowie die beschreibenden Parameter wie z. B. die Teilbereichsgröße b , der *Hatchlinienabstand* h und die Scanvektorlänge l_s (= Länge bis zu einer Richtungsänderung der Strahlfokusbewegung) zu nennen. Der den Energieeintrag definierende Parameter des Elektronenstrahls ist primär die Elektronenstrahlleistung, welche aus dem Produkt der Beschleunigungsspannung U_A und dem Strahlstrom I_B gebildet wird.

Die Abmaße des Schmelzbades (Schmelzbadlänge l und Schmelzbadbreite d) und somit die Breite der aufgeschmolzenen Spur werden durch verschiedene Parameter beeinflusst. Primär sind dies der Durchmesser des Elektronenstrahlfokus d_F und die zugehörige Elektronenstrahlleistung P . Im Weiteren hat der durch die Vorschubgeschwindigkeit v bestimmte zeitliche Verlauf der Energieeinbringung zusammen mit dem Abkühlverhalten nahe des Prozessortes einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausdehnung des Schmelzbades in und quer zur Vorschubrichtung. Durch eine angepasste Parameterwahl muss für eine homogene Oberfläche sichergestellt werden, dass die Schmelzbadbreite den Wert des *Hatch*abstandes überschreitet. Der Zeitverlauf und die Abhängigkeit von der Strahlablenkrichtung ergeben sich durch die Orientierung der Scanvektoren und der daraus resultierenden Vorschubrichtung. Für eine ganzheitliche Betrachtung wird in dieser Abbildung noch die Angabe der Schichtdicke t und des Überlappbereichs zweier Teilbereiche u mit aufgenommen.

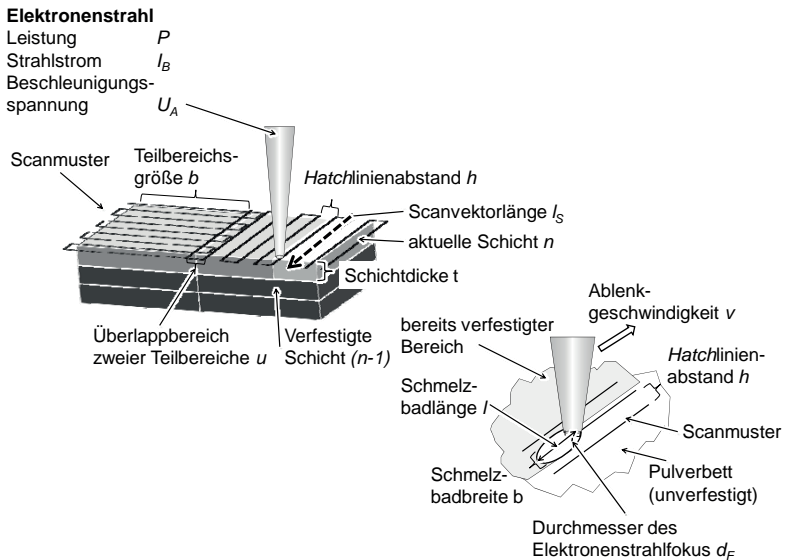


Abbildung 11: Parameter einer Scanstrategie beim Elektronenstrahlschmelzen

2.3 Bindungsmechanismen beim selektiven Verfestigen

Beim selektiven Verfestigen von Pulverwerkstoffen mittels einer Energiequelle können unterschiedliche Bindungsmechanismen auftreten. KRUTH ET AL. (2005B)

2.3 Bindungsmechanismen beim selektiven Verfestigen

zeigen, dass diese insbesondere von der jeweiligen Pulverlegierung bzw. Pulvermischung abhängen. Sie benennen vier Wirkprinzipien:

- chemisch induzierte Bindung
- Festphasensintern
- Flüssigphasensintern (teilweises Schmelzen)
- vollständiges Aufschmelzen

Eine *chemisch induzierte Bindung* tritt vor allem bei der Verfestigung keramischer Werkstoffe auf. Es wurden u. a. die Werkstoffe SiO_2 , ZrSiO_4 , Al_2TiO_5 und SiC (KLOCKE & ADER 2003) untersucht. Die kurze Energieeinwirkung des Laserstahls ermöglicht es nicht, die für den Festphasensinterprozess notwendigen Diffusionsvorgänge zu starten (KLOCKE & WIRTZ 1997). Stattdessen wird der keramische Werkstoff teilweise aufgespalten und die Elemente verbinden sich neu (KRUTH ET AL. 2005B). Da beim Elektronenstrahlschmelzen im Gegensatz zu den hier genannten keramischen Werkstoffen ausschließlich elektrisch leitende, metallische Werkstoffe eingesetzt werden, findet keine weitere Betrachtung dieser Bindungsart im Rahmen dieser Arbeit statt.

Prinzipiell kann ferner zwischen drei Sinterprozessen, dem *Festphasen-* und dem *Flüssigphasensintern* sowie ergänzend zu der obigen Aufzählung dem *Drucksintern* unterschieden werden (SCHATT 1992). Tritt während des Prozesses beim Sintern keine flüssige Phase innerhalb des ein- oder mehrkomponentigen Ausgangsmaterials auf, so wird vom Festphasensintern gesprochen. Die Pulverkörner werden auf eine Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur aufgeheizt und einige Zeit darauf belassen. Die Verdichtung erfolgt durch die Umlagerung der Teilchen und durch die Änderung ihrer Form und Größe. Charakteristisch für das Flüssigphasensintern ist das Vorhandensein einer zweiten Komponente in flüssiger Phase. Beim Drucksintern ist eine externe Kraft notwendig, um den Sinterprozess auszulösen (GERMAN 1996). Im Folgenden werden vor allem das Festphasen- und das Flüssigphasensintern näher erläutert, da bei der selektiven Verfestigung im Rahmen der generativen Fertigung insbesondere Effekte dieser Prozesse auftreten.

Beim Festphasensintern einkomponentiger Systeme treten zwischen den Pulverpartikeln Stofftransportphänomene auf atomarer Ebene durch Diffusion ohne das Ausbilden einer flüssigen Phase (GERMAN 1996) auf.

Ursächlich für diese Vorgänge sind einerseits die Tendenz zur Verringerung der freien spezifischen Oberflächenenergie und andererseits der Abbau der durch einen Pressvorgang hervorgerufenen Spannungen. Eine verringerte Oberflächen-

energie der Pulverschüttung wird durch Oberflächen- sowie durch Korngrenzendiffusion und den zugehörigen Materialtransport erreicht. Der Abbau von Spannungen wird über ein Versetzungskriechen innerhalb der Körner und an den Korngrenzen realisiert. Ein stoffschlüssiger Materialverbund ist durch das Zusammenspiel dieser Wirkprinzipien erreichbar. Weitere Effekte sind beim Festphasensintern von Mehrkomponentensystemen bzw. Pulvermischungen beobachtbar. Werden heterogene Pulver wie bspw. Verbundwerkstoffe, die nicht oder nur begrenzt ineinander löslich sind, eingesetzt, so bilden sich Phasengrenzen aus. Sind die Komponenten ineinander löslich, tritt die sogenannte Fremddiffusion auf, die durch das Konzentrationsgefälle an den Korngrenzen ausgelöst wird (SCHATT 1992).

Das Flüssigphasensintern hingegen ist ein Sintervorgang, bei dem im Teilchenverbund entweder zeitweise oder permanent eine Phase im flüssigen Zustand vorhanden ist. Hierbei tritt bei den physikalischen Wirkprinzipien der Effekt des Materialtransports durch Teilchenumordnung wesentlich intensiver in Erscheinung. Die Pulvermischung wird bis auf eine Temperatur aufgeheizt, bei der zuerst Festphasensintern zwischen den Pulverpartikeln auftritt. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, ist dies auf das Konzentrationsgefälle zurückzuführen. Die folgende Verdichtung während des Flüssigphasensinterns geschieht in drei Phasen. Sobald ein Teil des Pulvers aufgeschmolzen ist, wird dieses aufgrund der Kapillarkräfte zwischen die Pulverpartikel gezogen und es wird eine Neuordnung des Pulversystems ausgelöst. Dies geschieht vergleichsweise schnell, sodass eine erste starke Verdichtung zu beobachten ist. Während der Verdichtung lässt sich ein weiteres Fortschreiten des Effekts feststellen, bis ein vollständig verdichtetes Gefüge erreicht ist.

Auf diesen Erkenntnissen bauen KRUTH ET AL. (2005B) auf und fügen als einen weiteren Verfestigungsmechanismus das *vollständige Aufschmelzen* metallischer Pulverpartikel hinzu. Ziel ist ein vollständig dichtes Werkstoffgefüge in den herzustellenden Bauteilen. Das zugrunde liegende Wirkprinzip beschreibt dies für einen einkomponentigen, reinen Werkstoff, für Werkstofflegierungen oder Pulvermischungen. Die Pulverpartikel werden lokal im Bereich der Energieeinkbringung durch den Energiestrahle komplett in die schmelzflüssige Phase überführt und es wird so das gewünschte dichte Werkstoffgefüge erzielt.

Werden die beschriebenen Effekte verglichen, so weist das Sintern mit dem Auftreten einer flüssigen Phase als konventionelles Sinterverfahren große Ähnlichkeit zu den physikalischen Vorgängen beim selektiven Verfestigen pulverförmiger Werkstoffe auf (WAGNER 2003). Jedoch ist bei der Betrachtung des

2.4 Aufbau und Funktion von Anlagen für die generative Fertigung

Sinterns das vollständige lokale Aufschmelzen eines pulverförmigen metallischen Werkstoffs nicht berücksichtigt. Da beim Elektronenstrahlschmelzen im Bereich des Strahlfokus die Pulverkörner vollständig aufschmelzen (LUTZMANN 2010) und ein dichtes Gefüge erzielt werden kann (SIGL 2008), wird für die weitere Betrachtung das Wirkprinzip des vollständigen Aufschmelzens genutzt. Für die Untersuchungen ist es daher möglich, die dort vorherrschenden Mechanismen für die Beschreibung der Vorgänge beim Elektronenstrahlschmelzen vergleichend heranzuziehen.

2.4 Aufbau und Funktion von Anlagen für die generative Fertigung

2.4.1 Aufbau und Funktion

Der Aufbau einer Anlage zum selektiven Verfestigen pulverförmiger Werkstoffe ist nach VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995A durch die vier Hauptbestandteile Energiequelle, Pulverauftragsmechanismus, Bauraum und System zur Steuerung des Energieeintrags gekennzeichnet. Sie beschreiben diese prinzipielle Anordnung hinsichtlich eines laserstrahlbasierten Systems zur generativen Herstellung metallischer Bauteile. Für elektronenstrahlbasierte Systeme (ZÄH & KAHNERT 2006) ist dieser Aufbau ebenso erkennbar. In Abbildung 12 ist solch ein System schematisch mit einer Energiequelle, der Energieführung und dem Bauraum mit dem Auftragsmechanismus in Anlehnung an VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995A dargestellt.

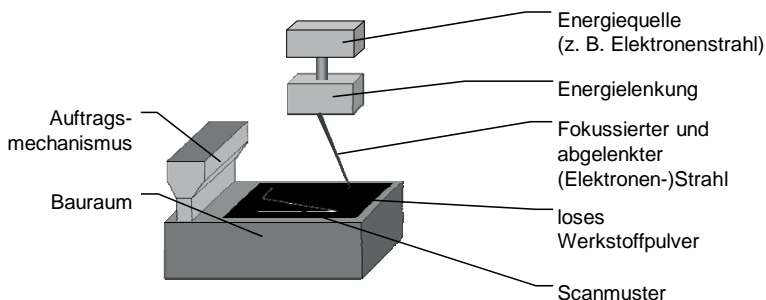


Abbildung 12: Aufbau eines Systems zum selektiven Verfestigen pulverförmiger Werkstoffe (in Anlehnung an VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995A)

Im Folgenden werden die Anlagenkomponenten *Energiequelle* (Abschnitt 2.4.2) und *Energieführung* (Abschnitt 2.4.3) näher erläutert.

2.4.2 Energiequellen für das selektive Aufschmelzen

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erläutert, benötigt der Prozess zum Verschmelzen der metallischen Pulverpartikel eine externe Energiequelle. Aktuell sind als Energiequellen verschiedene Lasersysteme, z. B. CO₂-, Nd:YAG- oder Faserlaser (BRANNER 2008), bzw. Elektronenstrahlerzeuger (FRUTH 2004, GOOD 2007, SIGL 2008) bekannt. Die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Energiequelle wirken sich sowohl auf den Prozess des Verfestigens einer Pulverschicht als auch auf die Verarbeitbarkeit unterschiedlicher Werkstoffsysteme aus.

LASER ist ein englisches Akronym für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (dt.: Lichtverstärkung durch angeregte Emission von Strahlung). In dieser Bezeichnung ist bereits die grundlegende Funktion und Wirkungsweise eines Lasers beschrieben.

Der Aufbau nahezu eines jeden Lasers ist gekennzeichnet durch einen optischen Resonator, d. h. eine Anordnung eines laseraktiven Mediums und von Spiegeln, welche die Lichtemissionen möglichst oft hin und her reflektieren. Aufgrund von Interferenz bildet sich dort in der Folge, wenn die optische Weglänge des Resonators ein Vielfaches der Wellenlänge des eingestrahnten Lichts beträgt, eine stehende Welle aus. Das laseraktive Medium kann je nach Lasertyp entweder ein Festkörper (z. B. Nd:YAG, Rubinlaser), eine Flüssigkeit (z. B. Farbstofflaser), ein Gas (z. B. CO₂-Laser) oder ein Halbleiter (z. B. Diodenlaser) sein. Die Wellenlänge des emittierten Laserstrahls ist dabei vom eingesetzten Medium (WIRTH 2004) abhängig.

Um den Laserstrahl zu erzeugen, muss eine Anregung des Lasermediums durch eine Pumpenergie stattfinden. Durch eine äußere Energie werden Elektronen eines Atoms vom Grundzustand in ein höheres Energieniveau gebracht. Nach Absorption der Energie gehen die Elektronen entweder spontan in ein niedrigeres Energieniveau über (spontane Emission) und emittieren Lichtstrahlung der Wellenlänge λ oder Emission findet angeregt durch ein Lichtquant der Wellenlänge λ statt (stimulierte Emission). Zwischen den Spiegeln bildet sich durch das Zusammenspiel der spontanen und der induzierten Emission eine stehende Welle kohärenten Lichts der Wellenlänge λ aus. Durch einen teildurchlässigen Spiegel kann nun die Laserstrahlung den Aufbau verlassen und mittels Optiken geformt, gelenkt und fokussiert werden (BUCHFINK & LEIBINGER-KAMMÜLLER 2006).

2.4 Aufbau und Funktion von Anlagen für die generative Fertigung

Der *Elektronenstrahl* ist, im Gegensatz zum Laser, ein Teilchenstrahl negativ geladener, beschleunigter Elektronen. Daher charakterisiert sich der Elektronenstrahl gegenüber dem Laserstrahl nach DOBENECK ET AL. (2002) im Wesentlichen durch drei physikalische Merkmale. Der Elektronenstrahl hat eine hohe Fokussierbarkeit und besitzt bei der Strahlerzeugung und bei der Energieeinkopplung in das Werkstück einen hohen Wirkungsgrad. Zudem ist er hinsichtlich der Fokuslage und der Leistung nahezu trägheitslos ansteuerbar. In den Abschnitten 2.6 und 2.7 wird das Funktionsprinzip des Elektronenstrahls näher beschrieben und es werden Aspekte zur elektronenstrahlbasierten generativen Fertigung näher untersucht und erläutert.

2.4.3 Systeme zur Energieführung

Um die Bauteilquerschnitte durch das selektive Aufschmelzen bzw. Versintern des Pulvers zu verfestigen, ist es notwendig, die Strahlleistung der jeweiligen Energiequelle kontrolliert in das Pulverbett einzubringen. Je nach den beschriebenen physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Energiequellen müssen passende Wirkprinzipien der Energieführung eingesetzt werden. In Tabelle 2 sind Beispiele für das Wirkprinzip und die Ausführung bei der jeweiligen Strahlquelle aufgeführt.

Energiequelle	Wirkprinzip der Energieführung	Ausführung
Laser	Optiken im Strahlengang	Spiegelgalvanometer
Elektronenstrahl	Elektromagnetische Felder	Elektromagnetische Spulen

Tabelle 2: Wirkprinzipien für die Strahlenlenkung in Abhängigkeit von der Energiequelle

Spiegelgalvanometer sind hochgenaue Systeme zum Bestimmen des elektrischen Stromes in einem Leiter. Sie werden neben ihrem ursprünglichen Einsatz in der Messtechnik (LERCH 2007) aktuell auch durch Umkehrung des Wirkprinzips in optischen Scannern für verschiedenste laserstrahlbasierte Applikationen zur Strahlführung genutzt. Beispielsweise sind dies das Laserbohren, das Laserbeschriften, das Laser-Remoteschweißen oder Anwendungen in der generativen Fertigung (SCANLAB 2010). Insbesondere durch das flexible Ablenken des Laserstrahls kann ein einfaches lokales Aufschmelzen von Pulverwerkstoffen beim generativen Fertigen durchgeführt werden (MACHT 1999). Grundsätzlich lässt der Einsatz zweier orthogonal angeordneter Spiegelgalvanometer in einer Ebene (2D-Scansystem) Leistungen bis 5 kW (SCANLAB 2010) zu. Es ist zu berücksich-

tigen, dass hohe Leistungen aufgrund der Parameter des eintretenden hochenergetischen Laserstrahls und der thermischen Eigenschaften der Ablenkoptik große Spiegel benötigen. Die höheren Massen bedeuten höhere Trägheiten, d. h. schlechtere mechanische Eigenschaften und somit geringere Ablenkgeschwindigkeiten (SCANLAB 2007). Für eine Auslegung ist daher ein Kompromiss anzustreben, der eine ausreichend hohe Leistung bei einer gleichzeitig hohen Ablenkgeschwindigkeit sicherstellt.

Im Gegensatz zum Lasersystem wird die Ablenkung des Elektronenstrahls durch stromdurchflossene *elektromagnetische Spulen*, die elektromagnetische Felder erzeugen, realisiert. Die Kombination zweier Ablenkspulen senkrecht zueinander ermöglicht es, den Elektronenstrahl in x- wie auch in y-Richtung abzulenken. Hierdurch lässt sich der Elektronenstrahlfokus frei in der Bearbeitungsebene platzieren. Zudem sprechen die in die Elektronenstrahl-Universalkammeranlage integrierten elektromagnetischen Spulen für die Elektronenstrahlablenkung nahezu trägheitslos auf sich ändernde Ströme an. Es sind hohe Ablenkfrequenzen in der Strahlsteuerung und somit große Ablenkgeschwindigkeiten sowie komplexe Bahnfiguren des Fokuspunktes in der Bearbeitungsebene erreichbar (SCHILLER ET AL. 1977). In Abschnitt 2.6 wird diese Beschreibung weiter detailliert.

2.5 Analyse von Scanstrategien

2.5.1 Ausgangssituation

Insbesondere bestimmen Scanstrategien und damit der Ablauf der Energieeinkbringung, die zugehörige Strahlleistung und die daraus resultierenden zeitlichen Verläufe der Energieverteilung die Bauteileigenschaften. Beispielhaft sind Eigenschaften wie die Schichtverbindung, die Oberflächengüte oder die Porosität zu nennen (KAHNERT ET AL. 2007). Im Gegensatz zu den meisten konventionellen Verfahren ist hierdurch eine direkte Abhängigkeit der Werkstoffparameter und -eigenschaften von den eingestellten Prozess- bzw. Energiestrahlpparametern erkennbar (XIE ET AL. 2005). Aufgrund dessen implementierten die verschiedenen Anlagenhersteller an unterschiedliche Aufgaben (z. B. Werkstoff, Bauteilgeometrie) angepasste, eigenständige Strategien in der jeweiligen Steuerung. Auf die jeweilige Lösung besteht zudem oftmals ein Patentschutz (z. B. SCHUTZRECHT DE10042134C2 2003, SCHUTZRECHT US5155324A 1992). Die beschriebenen Lösungen basieren vor allem auf der Füllung der Querschnittsfläche mit parallelen Linien. Bei einer Unterteilung der Fläche in Teilflächen (z. B. Quadrate) werden die einzelnen Füllmuster oftmals um 90° zueinander gedreht.

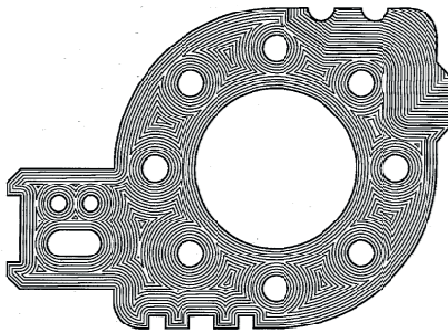
Die oben genannte Einschränkung der parallelen Linien, insbesondere für laserstrahlbasierte Verfahren, begründet sich auf den limitierten mechanischen Eigenschaften der Laserscanner (vergleiche hierzu Abschnitt 2.4.3). Wegen der Masenträgheit können entweder parallele Linien mit hohen Geschwindigkeiten oder komplexe Ablenkmuster, wie sie bspw. bei den Außenlinien der Querschnitte notwendig sind, langsam abgefahren werden. Aufgrund der auf elektromagnetischen Spulen basierenden, schnellen Elektronenstrahlablenkung sind beim Elektronenstrahlschmelzen neuartige Scanmuster und -strategien möglich. Um die damit verbundenen Potenziale umzusetzen, werden zunächst in Abschnitt 2.5.2 die Eigenschaften bereits bei laserstrahlbasierten Verfahren implementierter Scanstrategien im Kontext der für diese Arbeit vorliegenden Zielsetzung analysiert und für die weitere Methodenentwicklung aufbereitet. Daneben findet auch eine Bewertung von Frässtrategien statt, da die vergleichbare Aufgabenstellung, systematisch Flächen durch das Verfahren von Werkzeugen zu bearbeiten, es evtl. ermöglicht bestehende Lösungen zu adaptieren. In der anschließenden Zusammenfassung (Abschnitt 2.5.3) werden alle diese Strategien anhand der Fähigkeit, verschiedene Kriterien und Anforderungen zu erfüllen, gruppiert und es werden weitere Entwicklungspotenziale abgeleitet.

2.5.2 Bewertete Scanstrategien

2.5.2.1 Analyse verschiedener Scanmuster

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, bestimmen im Wesentlichen die verschiedenen Ausprägungen der Scanstrategien die erreichbare Bauteilqualität. Daher fand, abgestimmt auf die jeweilige Aufgabe bei der Bauteilherstellung, oftmals eine Modifizierung und Optimierung von Scanstrategien statt (MEINERS 1999). Auch wurden, um u. a. den Eigenspannungseintrag zu reduzieren, variierende Muster vorgeschlagen. Aufgrund der limitierten Scanneroptik ließen sich bei laserstrahlbasierten Verfahren lediglich die Unterteilung der Querschnittsfläche in Quadrate und deren schrittweise Verfestigung realisieren (KRUTH ET AL. 2004, SIMCHI & POHL 2003). Verschiedene Autoren beschrieben zudem Spiralen oder komplexere Füllmuster, wie bspw. FASS-Kurven, theoretisch und untersuchten sie simulativ (z. B. DAI & SHAW 2002, MA & BIN 2007). Veröffentlichungen hinsichtlich eines Einsatzes im realen Fertigungsprozess sind bis jetzt nicht bekannt. Ein weiterer Bestandteil der Ausführungen sind aus dem CNC- und HSC-Fräsen bekannte und potenziell für die generative Fertigung geeignete Bearbeitungsstrategien.

Die primäre Unterscheidung aller Scanstrategien findet zunächst hinsichtlich der Abgrenzung der beiden Teilbereiche *Outlining* und *Hatch* statt. Das *Outlining* beinhaltet, wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, den Ablenkweg zur Beschreibung der äußeren Kontur. Es bildet ausschließlich die Umrandung des Bauteilquerschnitts ab, sodass nur geringe Variationen, z. B. der Scanrichtung, möglich sind. Üblicherweise beinhaltet das Vorgehen mit *Outlining* ein oder mehrere Scanlinien zum Verfestigen des Bauteilumrisses und das *Hatchmuster* zum Füllen der restlichen Querschnittsfläche. Jedoch ist auch eine Fortführung des *Outlinings* mit äquidistanten konturparallelen Linien als *Hatchmuster* des gesamten Bauteils durchführbar. Diese Vorgehensweise zeichnet sich durch einen schnellen und an den Querschnitt angepassten Ablauf aus, wobei eine Modifizierung der Linienführung aufgrund von Geometrieelementen wie Einschnitten oder Aussparungen erforderlich ist. Weiterhin ergeben sich bei nicht konstanten Abständen in der Mitte des Bauteils Bereiche, in denen die Linien einen Abstand haben, der entweder kleiner oder maximal zweimal so groß ist wie der nominale Wert. In Abbildung 13 ist diese Systematik äquidistanter Konturlinien dargestellt.



Äquidistante Konturlinien
(Quelle: FAROUKI ET AL. 1995)

Abbildung 13: Beispielquerschnitt einer mit äquidistanten Linien gefüllten Kontur (FAROUKI ET AL. 1995)

Die Methode der parallelen Fülllinien zeichnet sich dadurch aus, dass diese Linien parallel zu einer Achse eingebracht werden. Diese Achse kann entweder mit einer der beiden Koordinatenrichtungen (x bzw. y) übereinstimmen oder sie ist um einen Winkel zu diesem gedreht. Meist erfolgt diese Ausrichtung an der Abszisse bzw. Ordinate, sodass x - bzw. y -Hatches entstehen. Einschnitte oder Aussparungen bedingen ein Unterbrechen an dieser Stelle (RAJAN ET AL. 2001). Auch erfolgt häufig die Variation der Richtungen der *Hatchlinien* über den

2.5 Analyse von Scanstrategien

Schichtaufbau hinweg, wodurch z. B. in der Schicht n x -Hatches und in der Schicht $n+1$ y -Hatches eingebracht werden (SCHUTZRECHT US5155324A 1992).

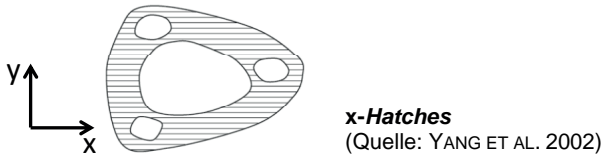


Abbildung 14: Beispielquerschnitt einer mit x -Hatches gefüllten Kontur (YANG ET AL. 2002)

Bei einer Spirale als Füllmuster (siehe Abbildung 15) wird, entweder ausgehend von der Mitte oder zur Mitte hin, eine kontinuierliche Linie zum Ausfüllen des Querschnitts mit Scanlinien eingebracht. Diese Form bietet sich neben regelmäßigen Außenformen (z. B. Kreise, Sechsecke) vor allem bei Querschnitten mit einer Unterteilung in regelmäßige Teilbereiche (z. B. Quadrate) an. In einer Untersuchung stellten DAI & SHAW (2002) mittels einer thermischen Simulation ein spiralförmiges Scanmuster einem solchen mit x -Hatches gegenüber. Für beide Scanmuster wurden für eine Schicht, welche im Rahmen der Versuchsdurchführung durch eine Nickelplatte angenähert wurde, das transiente Temperaturfeld einer sich bewegenden Laserquelle und die hieraus resultierenden Eigenspannungen berechnet sowie verglichen. Die Simulationsergebnisse zeigen u. a. die Potenziale des Musters hinsichtlich eines geringeren Eigenspannungszustands. Die Umsetzung in einer Anlage z. B. für das SLS oder das SLM wurde jedoch nicht beschrieben.

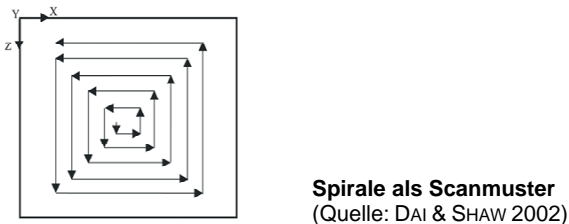


Abbildung 15: Von DAI & SHAW (2002) simulierte Spirale als Scanmuster zur Berechnung des Temperaturfeldes und des entstehenden Verzugs

Das Akronym FASS steht für *space-filling, self-avoiding, simple und self-similar*, dt.: raumfüllend, selbstaussweichend, einfach und selbstähnlich. Somit

bezeichnen FASS-Kurven für Flächen eine eindimensionale Linie, welche diese Fläche komplett durchläuft und ausfüllt. MA & BIN (2007) untersuchten hierzu simulationsgestützt die Eigenschaften der als FASS-Kurve beschreibbaren Hilbert-Kurve (vgl. Abbildung 16) für das selektive Verfestigen in der schichtweisen Fertigung. Diese ist eine stetige Kurve, welche, durch Wiederholung ihres Konstruktionsverfahrens jedem beliebigen Punkt einer quadratischen Fläche beliebig nahe kommt und die Fläche vollständig ausfüllt. Hierbei zeigten die Autoren, dass sich durch die konstanten Abstände der Teillinien und die Selbstähnlichkeit der Kurve ein gegenüber anderen Scanmustern homogeneres Temperaturfeld ausbildet. Weitere, potenziell für die Erzeugung von Scanmustern geeignete FASS-Kurven sind bspw. die Peanokurve, die Gosperkurve, die E-Kurve und die Moorekurve (COX ET AL. 1994, YANG ET AL. 2003).

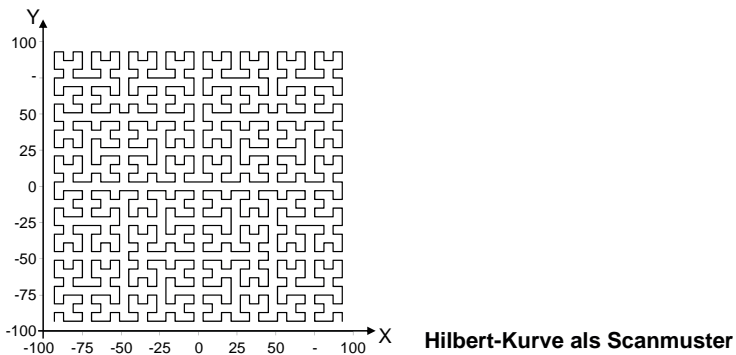


Abbildung 16: Mit dem Algorithmus einer Hilbert-Kurve generierter Strahlalenkweg

Neben den bereits vorgestellten Lösungen bestehender generativer Verfahren gibt es die prinzipielle Möglichkeit, Strategien des HSC- sowie des konventionellen Fräsens an die schichtweise Fertigung zu adaptieren. Solche Strategien sind in den verschiedenen CNC-Steuerungen, bspw. für die Fertigung von Taschen oder Nuten sowie für die Ausarbeitung von Bauteilumrissen, integriert. Der Zweck dieser Strategien ist es, die Geometriemerkmale prozess- und zeitoptimal zu erzeugen. Dabei ist es wichtig, möglichst konstante Zerspankräfte bzw. minimale Verfahrenswerte mit wenigen Richtungsänderungen zu gewährleisten (ANOTAIPAIBOON & MAKHANOV 2004).

Wie HASTRICH (2006) in seiner Arbeit ausführt, werden für die Erzeugung von Fräsbahnen in einer Bauteilebene verschiedene grundlegende Strategien einge-

setzt, u. a. parallele, spiral- oder mäanderförmige Muster. Die Bearbeitungsreihenfolge beinhaltet das grobe Herausarbeiten (= Schruppen) der Kontur und das anschließende Endbearbeiten (= Schlichten). Die grundlegenden spanenden Bearbeitungsstrategien sind meist auf zweidimensionale Anforderungen reduziert dargestellt. Daher ist eine prinzipielle Übertragung dieser zweidimensionalen Strategien auf die generative Fertigung möglich bzw. durch existierende Scanstrategien bereits abgedeckt.

Zusätzlich besteht bei einer Fräsbearbeitung vor allem bei mehrachsigen Maschinen die Möglichkeit, Freiformflächen zu erzeugen bzw. die Bearbeitung dreidimensional, d. h. nicht an eine Bauteilebene gebunden, durchzuführen (BOHEZ ET AL. 2004). Aufgrund der isolierten zweidimensionalen Problemstellung während der selektiven Verfestigung einer Pulverschicht beim generativen Fertigungsprozess können diese Strategien für die spanende Erzeugung von Freiformflächen auf die hier betrachtete Aufgabenstellung nicht unmittelbar übertragen werden.

Die beschriebenen grundlegenden (Scan-)Strategien, insbesondere die Definition eines *Hatchmusters*, können auch für die Teilbereiche eines Querschnitts umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang untersuchten MERCELIS & KRUTH (2006) den Einfluss verschiedener Scanstrategien auf die Spannungen im Bauteil. Hierzu wurden Scanmuster mit verschiedenen Scanlängen bzw. -richtungen wie auch mit einer Unterteilung in quadratische Teilbereiche definiert. Insbesondere konnten bei der Verfestigung des metallischen Pulvers bei einem in Teilbereiche unterteilen, verglichen mit einem nicht-unterteilten Querschnitt, günstigere Gefügestände erreicht werden. Dies ist auf das Auftreten eines spannungsfreien Zustands an den jeweiligen Grenzen des verfestigten Materials zum Pulver zurückzuführen. Spannungen werden erst durch das sukzessive Aufschmelzen und Verbinden aller Teilbereiche eingebracht (MEINERS 1999). Dies resultiert in insgesamt geringen Eigenspannungen im Gefüge. Die Autoren führen diesen Ansatz fort, indem sie auch die Reihenfolge der zu verfestigenden Bereiche variieren. Dieses Vorgehen, einen Schichtquerschnitt in einzelne Teilbereiche zu unterteilen, wird von nahezu allen Anlagenherstellern für eine prozesssichere Verfestigung appliziert (KUMAR & KRUTH 2008). Ausdrücklich sind hier die *Island-Strategie* mit einer stochastischen Auswahl des zu verfestigenden Teilbereichs der Firma ConceptLaser, beschrieben in SCHUTZRECHT DE10042134C2 2003, oder die Strategie Chess (siehe Abbildung 17) des Unternehmens EOS (TRENKE 2002) zu nennen. Dieses Vorgehen ist auf alle Formen ausweitbar, die zusammengesetzt eine Fläche ohne Lücken ergeben. Vorzugsweise sind dies Formen wie Dreiecke, Quadrate oder Hexagone. Als *Hatchmuster* der Teilbereiche sind bei aktuell erhältlichen Anlagen fast ausschließlich parallele Fülllinien,

die sich alternierend in x- und y-Richtung bewegen, in die Anlagensteuerung integriert. Zudem sind auch äquidistante (Teil-)Konturlinien, Spiralen oder weitere Muster einsetzbar.

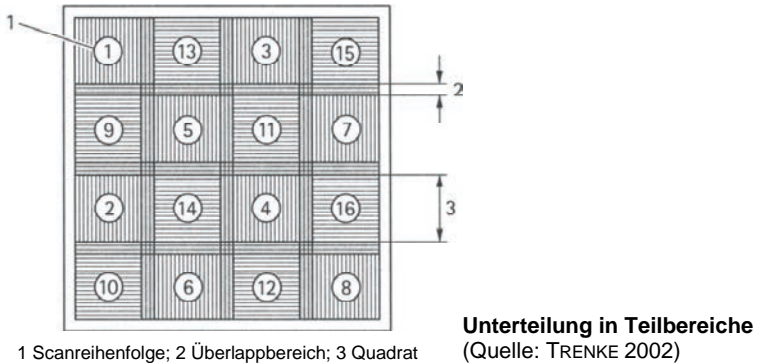
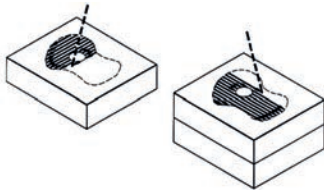


Abbildung 17: Scanmuster „Chess“ des Unternehmens EOS (TRENKE 2002)

Durch die wiederholte, fokussierte, gleichgerichtete und lokale Energieeinbringung zur selektiven Verfestigung des metallischen Pulvers mittels einer Energiequelle bilden sich hohe Temperaturgradienten innerhalb der Werkstoffschicht wie auch des Bauteils aus. Durch die dort meist auch inhomogenen Abkühlraten werden Eigenspannungen im Werkstoffgefüge induziert (OVER 2002). Für ein Gefüge mit wenigen Eigenspannungen soll daher durch eine angepasste Prozessführung ein homogenes Temperaturfeld im jeweiligen Schichtquerschnitt erzeugt werden. Mit dieser Zielsetzung beschreiben Deckard et al. im SCHUTZRECHT US 5155324A (1992) oder SIMCHI & POHL (2003) den Wechsel der Scanrichtung bei verschiedenen Schichtquerschnitten (siehe Abbildung 18). Durch diese wechselnden Vorzugsrichtungen und Temperaturverteilungen gleichen sich zum einen vorhandene Eigenspannungen durch den Eintrag neuer Schichten aus. Zum anderen werden aufgrund des Wärmeeintrags in die oberste Schicht in den darunterliegenden Schichten vorhandene Eigenspannungszustände teilweise aufgelöst und neu gebildet (WANG ET AL. 2007). Durch die verschiedenen zeitlichen Abfolgen bei der Verfestigung verschiedener Schichten entstehen auch in den bereits gebauten Schichten keine neuen übergeordneten stationären Temperaturverteilungen. Somit tritt keine Eigenspannungsverstärkung ein, sondern die ungeordneten Eigenspannungszustände heben sich gegenseitig auf.



Wechselnde Scanrichtungen

(Quelle: SCHUTZRECHT US5155324A 1992)

Abbildung 18: Wechselnde Scanrichtungen bei aufeinander folgenden Schichten

2.5.2.2 Einfluss von Prozessparametern auf die strahlbasierte generative Fertigung

Eine Optimierung der *Oberflächenqualität* muss durch das Verhindern des Auftretens zweier Effekte erzielt werden. Bisherige Beobachtungen zeigten, dass neben einer unzureichend verfestigten Oberfläche auch Schmelzkügelchen, der sogenannte *Balling*-Effekt, auftreten. Diese beiden prozessbedingten Effekte wurden bereits in verschiedenen Untersuchungen laserstrahlbasierter generativer Fertigungsverfahren näher betrachtet. Dabei müssen sie, wie u. a. von KRUTH ET AL. (2003) und DAS (2001) beschrieben, insbesondere im Zusammenhang mit der eingebrachten Energiedichte pro Volumeneinheit bzw. dem Verhältnis der Ablenkgeschwindigkeit zur Strahlleistung gesehen werden. Die Autoren weisen nach, dass die Kugelbildung auf die zunehmende Oberflächenspannung der Schmelze zurückzuführen ist. KRUTH ET AL. (2004) erstellten hierzu ein Übersichtsdiagramm (siehe Abbildung 19), in welchem der Bereich einer guten Oberfläche dem einer ungenügenden Verfestigung bzw. dem Auftreten des *Balling*-Effekts gegenübergestellt ist. Das dargestellte Parameterfeld zeigt, dass sich extreme Geschwindigkeits- bzw. Strahlleistungsverhältnisse negativ auf die Prozessqualität auswirken. Neben einer zu geringen Energieeinbringung muss auch ein zu hoher Energieeintrag durch eine falsch gewählte Strahlleistung oder eine zu geringe Ablenkgeschwindigkeit für den jeweiligen Werkstoff sowie die jeweilige Schichtgeometrie bei der Herstellung eines Bauteils vermieden werden.

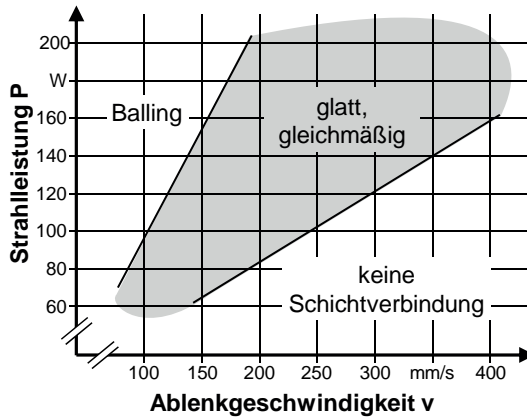


Abbildung 19: Prozessübersicht unterschiedlich erzeugter Oberflächen beim Selektiven Lasersintern (in Anlehnung an KRUTH ET AL. 2003)

KRUTH ET AL. (2003) fügen in diesem Zusammenhang als weiteren, die Oberflächenqualität bestimmenden Faktor das Verhältnis von Länge zu Breite der geometrischen Ausdehnung des Schmelzbades hinzu. Ab einem Wert $l/d > 2,1$ zieht sich die Schmelze aufgrund der vorherrschenden Oberflächenspannung zu einer Kugel zusammen (siehe Abbildung 20). Durch an die Schichtgeometrie angepasste Scanparameter wie auch Scanmuster müssen die Schmelzbadabmaße konstant gehalten werden. Eine exemplarische Vorgehensweise ist bspw. die Unterteilung des Schichtquerschnitts in Teilbereiche für kontinuierliche Verfestigungsbedingungen innerhalb einer Schicht.

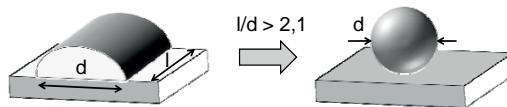


Abbildung 20: Ausbildung einer Schmelzkugel bei Schmelzbadlänge l und Schmelzbadbreite d mit $l/d > 2$ (in Anlehnung an KRUTH ET AL. 2003)

Im Weiteren ist der *Verfestigungsgrad* einer Schicht mit dem wesentlichen Einflussfaktor *Hatchlinienabstand* zu betrachten. Der Abstand zweier von einem Energiestrahle abgefahrenen *Hatchlinien* eines Scanmusters wirkt sich auf das entstehende Gefüge einer Schicht aus. Unter anderem beschreiben DAS (2001),

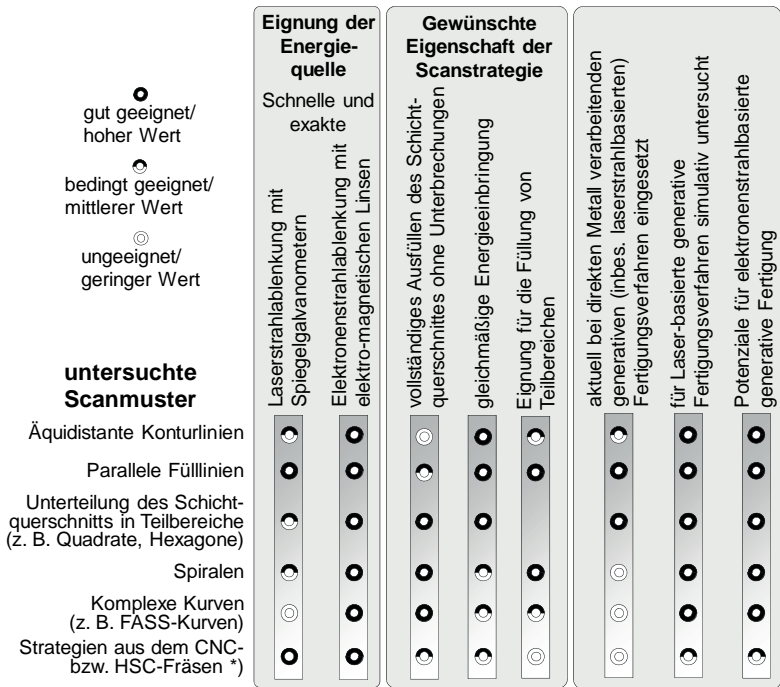
2.5 Analyse von Scanstrategien

MEINERS (1999) und OVER (2002) in ihren Arbeiten, dass bei zu hohem *Hatchli-*nienabstand keine zusammenhängende Oberfläche mehr erreicht werden kann.

Diese Ausführungen zeigen, dass für eine prozesssichere Erzeugung hochwertiger Schichtoberflächen eine über die singuläre Parameterbetrachtung hinausgehende Analyse notwendig ist. Insbesondere die hier dargestellten Wechselwirkungen mit Strahlparametern müssen für die Gestaltung von Scanstrategien berücksichtigt werden.

2.5.3 Zusammenfassung

Die folgende Abbildung 21 präsentiert einen zusammenfassenden Vergleich der in den vorangegangenen Abschnitten betrachteten Scanstrategien bzw. der implizit darin enthaltenen Scanmuster. Eine Bewertung erfolgt hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie Eignung der jeweiligen Energiequelle Laser- bzw. Elektronenstrahl und gewünschter Eigenschaften der Scanstrategie (z. B. vollständiges Ausfüllen des Schichtquerschnitts, gleichmäßige Energieeinbringung oder Eignung für die Unterteilung in Teilbereiche). Weitere Gesichtspunkte sind z. B. der bereits erfolgte Einsatz bei laserstrahlbasierten generativen Verfahren, die Untersuchung innerhalb von Prozesssimulationen oder die grundsätzliche Eignung für die elektronenstrahlbasierte generative Fertigung.



*) Aufgrund der oftmaligen Mehrdimensionalität (z. B. 5-Achs-Fräsen) von Frässtrategien kann nur eine grobe Einordnung vorgenommen werden

Abbildung 21: Vergleich der bisher eingesetzten Scanstrategien

Aus der Zusammenstellung ist ersichtlich, dass aktuell überwiegend parallele Fülllinien, oftmals mit einer Unterteilung des Schichtquerschnitts, sowie äquidistante Konturlinien bei schichtweise arbeitenden Verfahren genutzt werden. Die Ablenkwege dieser Strategien können mit laserstrahlbasierten Anlagen schnell und präzise abgefahren werden. Weitere Scanmuster (z. B. Spiralen, FASS-Kurven) wurden bisher nahezu ausschließlich simulativ untersucht. Die Elektronenstrahlablenkung stellt darüber hinaus auch bei diesen Scanstrategien die erforderliche Präzision bei einer gleichzeitig hohen Ablenkgeschwindigkeit zur Verfügung. Wie in Abschnitt 2.5.2.1 beschrieben, ermöglichen u. a. die Unterteilung des Schichtquerschnitts, Spiralen oder komplexe Kurven als Füllmuster eine gleichmäßige Energieeinstrahlung. Hingegen ist das vollständige Ausfüllen eines Schichtquerschnitts ohne Linienunterbrechungen vor allem mit äquidistanten Konturlinien und parallelen Fülllinien möglich. Diese können neben den Spiralmustern oder den komplexen Kurven zum Füllen von Teilbereichen genutzt

werden. Die genannten Eigenschaften zeigen, dass die gestellten Anforderungen wie gleichmäßige Energieeinbringung oder vollständiges Ausfüllen von Teilbereichen mit den beschriebenen Strategieelementen wie äquidistanten Konturlinien oder Spiralen erreicht werden können. Weiterhin ist zu sehen, dass die elektronenstrahlbasierte generative Fertigung bei allen beschriebenen Scanstrategieelementen grundsätzlich durchführbar ist. Bei aktuellen laserstrahlbasierten Anlagen werden vor allem äquidistante und parallele Konturlinien und die Unterteilung in Teilbereiche eingesetzt.

Zudem müssen, wie in den letzten Abschnitten beschrieben, für eine umfassende Definition einer Scanstrategie auch die zugehörigen Strahlparameter in Betracht gezogen werden. Kenngrößen wie bspw. die Strahlleistung oder die Ablenkgeschwindigkeit sind mit entscheidend für das Ergebnis einer Schichtverfestigung wie auch kumuliert für die Qualität eines Bauteils.

Insgesamt sind aus diesen Ausführungen zum einen deutlich die Vielfältigkeit der zu betrachtenden Parameter und zum anderen die Notwendigkeit, den Aufbau einer Scanstrategie allgemein zu beschreiben, ersichtlich.

2.6 Der Elektronenstrahl

2.6.1 Allgemeines

Der Elektronenstrahl wird durch das Beschleunigen von freien Elektronen mittels eines elektrischen Feldes gebildet. Einsatz findet er in verschiedenen Technikbereichen, von der Erzeugung eines Fernsehbildes in einer Bildröhre bis hin zum Einsatz in der Produktionstechnik. Das Prinzip der Elektronenstrahlerzeugung ist bei allen Anwendungen gleich. Unterschiede ergeben sich je nach Einsatzzweck des Elektronenstrahls in den Bereichen der Strahlformung und -ablenkung sowie in der Wahl der Leistungsparameter wie der Beschleunigungsspannung und des Strahlstroms.

In Abschnitt 2.6.2 wird zunächst auf die relevanten Funktionen zur Erzeugung freier Elektronen und zur Formung eines Elektronenstrahls eingegangen. Prozesse, die in metallischen Werkstoffen beim Auftreffen eines Elektronenstrahls stattfinden, werden in Abschnitt 2.6.3 beschrieben. Abschließend findet eine Erläuterung der für die Beschreibung des Elektronenstrahlschmelzens relevanten Strahlparameter in Abschnitt 2.6.4 statt.

2.6.2 Funktionsprinzip der Strahlerzeugung und -formung

Für die Erzeugung eines Elektronenstrahls werden primär freie, d. h. nicht in Atomen gebundene Elektronen benötigt. Diese freien Elektronen können aus festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen gewonnen werden. In der Elektronenstrahltechnik hat die Emission der Elektronen aus fester Materie die größte Bedeutung erlangt (DOBENECK ET AL. 2001). Dabei formen die bei einer Glühkathode aus dem Metallgitterverbund austretenden Elektronen die sogenannte Elektronenwolke als Basis für die Elektronenstrahlerzeugung. Die Auswahl des Kathodenmaterials erfolgt nach dem Gesichtspunkt einer möglichst geringen Austrittsarbeit, wodurch sich die Heizleistung und damit der Energieverbrauch auf ein Minimum beschränken lassen. Bei industriellen produktionstechnischen Fertigungsverfahren zur thermischen Bearbeitung kommen für die Erzeugung von Elektronenstrahlen vorwiegend Bandkathoden aus Wolfram zum Einsatz (SCHULTZ 2000).

Die freien Elektronen lassen sich durch beschleunigende elektrostatische und fokussierende elektromagnetische Felder zu einem Strahl formen. Die Eigenschaften des entstehenden Elektronenstrahls werden durch die Ausprägungen der jeweiligen Feldlinien bestimmt. Für die Erzeugung der benötigten elektrostatischen Felder lassen sich zwei prinzipielle Varianten unterscheiden, das Diodensystem und das Triodensystem (DOBENECK ET AL. 2001). Gleich ist bei beiden Systemen die anliegende elektrische Potenzialdifferenz zwischen der negativ geladenen Kathode und der auf Erdpotenzial liegenden Anode. Die Potenzialdifferenz beschleunigt die Elektronen in Richtung der Anode. Unterschiede ergeben sich dadurch, dass bei den Triodensystemen im Gegensatz zu den Diodensystemen eine zusätzliche negative Spannung, die sogenannte Wehnelt- bzw. Sperrspannung, an der Steuerelektrode anliegt. Damit kann der Anteil der Elektronen, der von der Kathode weg beschleunigt wird, geregelt werden (SCHULTZ 2000). Mit diesem Prinzip ist es zudem möglich, den Strahlstrom komplett zu sperren. Auch ist die Regelung über ein Steuergitter einfacher und präziser durchführbar als über die Heizung der Kathode, sodass sich die Triodensysteme weitgehend durchgesetzt haben. Sie werden vor allem dort verbaut, wo schnelle Strahlstromänderungen nötig sind und eine hochgenaue Regelung des Strahlstroms gefordert wird (SCHILLER ET AL. 1977).

Im Bereich der Strahlformung werden hohe Anforderungen an die Fokussierbarkeit und Konstanz des Strahlfokus gestellt. So soll der Strahlfleck bei allen Fokuslagen nahezu kreisförmig sein und seine Position nicht verändern. Das heißt, der Elektronenstrahl muss frei von Abbildungsfehlern rechtwinklig

2.6 Der Elektronenstrahl

auf die Werkstückoberfläche treffen. Um dies zu erreichen, werden eventuell notwendige Strahlkorrekturen durch die Stigmator- und Justierspulen durchgeführt. Die Justierspulen haben dabei die Aufgabe, die Energieverteilung möglichst zentrisch im Strahlengang einzustellen. Der Stigmator gleicht elektrische und magnetische Störeinflüsse auf die Rotationssymmetrie des Elektronenstrahls, die astigmatischen Fehler, aus. Ein typisches Kennzeichen des Astigmatismus ist der elliptische, fast strichförmige Strahlfleck mit Änderung der Achsrichtung beim Wechsel der Fokusslage (SCHULTZ 2000). Die prinzipielle Anordnung der notwendigen elektromagnetischen Spulen ist in Abbildung 22 zu sehen.

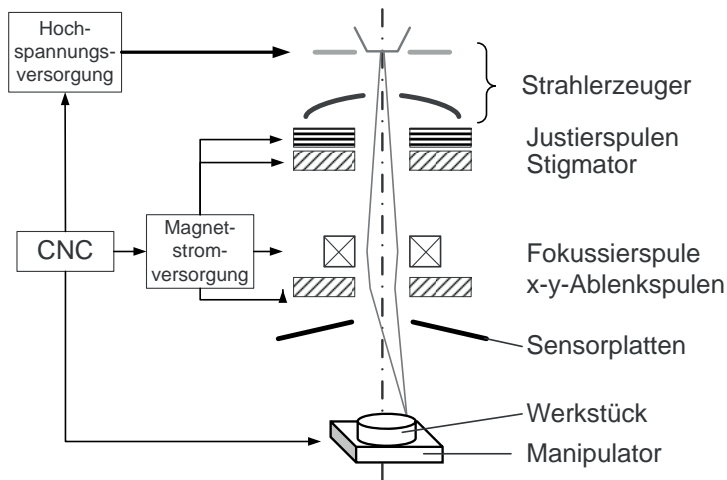


Abbildung 22: Aufbau eines Elektronenstrahlgenerators mit elektromagnetischen Spulen (nach DOBENECK ET AL. 2001)

Ein von einer Ringspule erzeugtes Magnetfeld wirkt – wie eine Sammellinse auf den Lichtstrahl – fokussierend auf den Elektronenstrahl. Die Elektronen verlassen die magnetische Linse ohne Geschwindigkeitsänderung auf gering gekrümmten Bahnen und treffen in einem typisch kleinen Fokusedurchmesser von etwa 0,1 bis 1,0 mm, je nach Strahlleistung und Fokusabstand, zusammen (WEISER 1995).

Zuletzt wird der Elektronenstrahl mittels zweier senkrecht zueinander angeordneten Spulen je nach Stromdurchfluss in x- bzw. y-Richtung abgelenkt. Der Aufbau von Justierung, Stigmator und Ablenkung ist grundsätzlich ähnlich, Unterschiede gibt es jedoch in den Ringwicklungen der Spulen, den Polungen oder der Anzahl der Pole. Diese stromdurchflossenen Spulen erzeugen ein für die jeweilige Aufgabe charakteristisch geformtes Magnetfeld. Die Einstellung erfolgt durch die

Regelung des Stromflusses in den Spulen, wobei der anliegende Gleichstrom das Magnetfeld ausbildet. Die Feldlinienrichtung des magnetischen Feldes muss dabei senkrecht zur Strahlachse sein. Aufgrund der Lenz'schen Gesetze ergibt sich eine Ablenkung des Elektronenstrahls analog zur Rechte-Hand-Regel senkrecht zu der von den Magnetfeldlinien und dem Richtungsvektor des Elektronenstrahls aufgespannten Ebene. Speziell geformte Spulen bilden ein homogenes Magnetfeld aus, sodass eine konstante Ablenkung sichergestellt werden kann (SCHULTZ 2000). Insbesondere ist eine Variation der Stromstärke wie auch der Polung bei der x-/y-Ablenkung sehr schnell möglich, sodass der Strahl entweder in x- oder y-Richtung oder in einem beliebigen Winkel dazwischen aus seiner Achse statisch abgelenkt werden kann. Mit wechselnden Strömen und Polungen wird der Strahl gependelt, d. h. der Fokuspunkt bleibt nicht auf einer konstanten Position, sondern wird von den Magnetspulen dynamisch relativ zur Strahlachse abgelenkt. Es sind verschiedenste Pendelformen möglich, wobei sich keine Einschränkungen durch massebehaftete Bauteile ergeben (DOBENECK ET AL. 2001). Auch ist aufgrund der berührungslos arbeitenden elektromagnetischen Spulen die flexible Ablenkung auch hochenergetischer Elektronenstrahlung im Bereich einer zweistelligen Zahl an Kilowatt möglich (SCHILLER ET AL. 1977).

2.6.3 Prozesse in metallischen Werkstoffen

Die beschleunigten und auf einen kleinen Bereich fokussierten Elektronen des Strahls wirken mit einer sehr hohen kinetischen Energie ($E_{\text{kin}} = eU_A$) auf die jeweilige Werkstoffoberfläche ein. Bei Verfahren zur Bearbeitung metallischer Werkstoffe werden meist kleine Fokusedurchmesser eingestellt, sodass hohe Energiedichten und die daraus resultierenden Effekte wie bspw. das Ausbilden einer Dampfkapillare entstehen. Die Energieübertragung der Strahlelektronen auf das zu bearbeitende Werkstück und die zugehörigen Effekte sind im Einzelnen sehr komplexe Abläufe und werden in Abbildung 23 vereinfacht dargestellt.

2.6 Der Elektronenstrahl

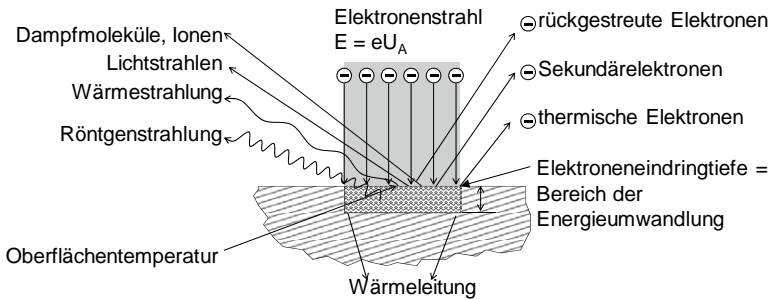


Abbildung 23: Energieumwandlung am Einwirkort des Elektronenstrahls (in Anlehnung an SCHILLER ET AL. 1977, SCHULTZ 2000)

Vor allem Interaktionen zwischen den Strahlelektronen, auch Primärelektronen genannt, und den Atomen bzw. Molekülen des Werkstoffs setzen am Einwirkort einen Großteil der kinetischen Energie durch Wechselwirkungen in Anregungsenergie um (SCHULTZ 2000). Bei Metallen führt dies zu einer erhöhten Bewegungsenergie im Metallgitterverbund bis hin zum Aufschmelzen und Verdampfen des Werkstoffs. Die Wärmeleitung verursacht einen weiteren Transport der Wärmenergie in den Bereich des umgebenden Werkstoffs. Ein geringer Teil der Primärelektronen wird über elastische Stöße an der Werkstückoberfläche zurückgestreut oder diffundiert unter teilweisem Energieverlust zurück an die Werkstoffoberfläche (elastisch gestreute und rückdiffundierte Elektronen $E = 0 \dots eU_A$). Im Weiteren werden Leitungselektronen des Werkstoffs durch Stoßvorgänge mit Primärelektronen aus dem Gitterverbund herausgeschleudert und verlassen als Sekundärelektronen ($E < 50 \text{ eV}$) ebenfalls die Oberfläche. Bei entsprechend hohen Temperaturen am Einwirkort entstehen zudem thermische Elektronen ($E < 1 \text{ eV}$), welche aus dem Metallgitterverbund austreten (SCHILLER ET AL. 1977).

Daneben bilden sich elektromagnetische Strahlen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen aus. Am augenscheinlichsten ist das Leuchten der Bearbeitungsoberfläche bei Glüh Temperatur in dem für den Menschen sichtbaren Wellenlängenbereich. Zudem emittiert das heiße Werkstück Wärmeenergie durch Wärmestrahlung. Der weitaus größte Anteil lässt sich der Röntgenstrahlung zurechnen (SCHULTZ 2000). Diese entsteht durch das Abbremsen der Elektronen an der Werkstückoberfläche. Die Röntgenstrahlung ist biologisch wirksam und erbgutverändernd, sodass spezielle Maßnahmen wie Bleiabschirmungen zum Schutz der Bediener ergriffen werden müssen (PEINSIPP ET AL. 2003). Ferner

können bspw. geladene Teilchen, d. h. Ionen, aus dem Werkstoff herausgeschleudert werden (SCHILLER *ET AL.* 1977). Auch verdampft bei entsprechenden Bedingungen der über den Schmelzpunkt hinaus aufgeheizte Werkstoff. Dieser Effekt ist insbesondere für die Durchführung des Tiefschweißens im Bereich der Fügetechnik erwünscht. Durch die hierbei entstehende Dampfkapillare am Strahlauftreffpunkt lassen sich sehr hohe Einschweißiefen und hohe Nahttiefe-zu-Nahtbreite-Verhältnisse erreichen (WIESNER 1989).

Die aus den oben beschriebenen Effekten abzuleitende Bestimmung der Energiebilanz und somit des Wirkungsgrades ist von verschiedenen Faktoren wie bspw. dem Werkstoff, der Temperatur und der Oberflächengeometrie abhängig. Eine pauschale Angabe des Wirkungsgrades der thermischen Energieeinkopplung ist somit nicht möglich. Dieser reicht von 60 % bei Stahl und glatter Oberfläche bis hin zu 90 % beim Auftreten einer Dampfkapillare (SCHULTZ 2000).

2.6.4 Parameter für das Elektronenstrahlschmelzen

Für die Elektronenstrahlerzeugung und die Prozessführung sind unterschiedliche, an der jeweiligen Elektronenstrahlanlage einstellbare Parameter von Bedeutung. Im Folgenden werden ausgewählte, für das Fertigungsverfahren Elektronenstrahlschmelzen relevante Prozessparameter aufgeführt und näher erläutert. Als Basis dienen hierfür die DIN 32511 (2007) und die DIN EN ISO 14744 (2008), die jeweils Begriffe für Prozesse und Geräte des Elektronenstrahlschweißens definieren. Als elektronenstrahlbezogene Parameter für die Beschreibung des Elektronenstrahlschmelzens sind in diesem Zusammenhang vor allem der Heizstrom der Kathode (I_H), die Beschleunigungsspannung (U_A), die Wehnelt- bzw. Steuerspannung (U_W), der Strahlstrom, die resultierende Strahlleistung (P) und der einzustellende Linsenstrom (I_L) zu nennen.

Die über den Heizstrom erhitzte Kathode emittiert, wie in Abschnitt 2.6.2 beschrieben, eine ausreichende Anzahl an Elektronen aus dem Kathodenmaterial und bildet so die Elektronenwolke aus. Je nach benötigter Anzahl von Elektronen und Werkstoff sind unterschiedliche Temperaturen und somit auch ein unterschiedlich großer Heizstrom notwendig. Ziel ist es, den Raumladungsbetrieb sicherzustellen, d. h. durch eine ausreichende Kathodentemperatur mehr Elektronen zu emittieren, als durch die Beschleunigungsspannung abgesaugt werden.

Mit der Wehneltspannung (U_W), auch Steuerspannung genannt, kann eine schnelle Anpassung des Strahlstroms stattfinden. Es bildet sich ein negatives elektrisches Potenzial zwischen Wehneltzylinder und Kathode aus, das von den Elek-

tronen überwunden werden muss, bevor deren Beschleunigung erfolgt. Im Bereich des Raumladungsbetriebs der Kathode ist der Strahlstrom somit durch eine entsprechende Wahl des Potenzialunterschieds beeinflussbar. Der resultierende Strahlstrom (I_B) ist das Maß für die Anzahl der Elektronen und somit der elektrischen Ladung, die pro Sekunde durch die Hochspannung in Richtung der Bauteiloberfläche hin beschleunigt wird. Üblicherweise wird zur Größenangabe des Strahlstroms die Einheit Milliampere [mA] gebraucht.

Eine Beschleunigungsspannung U_A im Bereich von mehreren 10 kV ist nach SCHULTZ (2000) die Voraussetzung für einen hochenergetischen Elektronenstrahl. Sie wird an der Kathode als negative Spannung angelegt, wobei typische Werte, z. B. für Schweißanlagen, ca. 60 kV bis 200 kV betragen. Die Anode ist dabei mit dem Erdpotenzial elektrisch verbunden. Die entstehende elektrische Potenzialdifferenz beschleunigt die von der beheizten Kathode emittierten Elektronen. Üblich sind hierbei Werte für den sich ausbildenden Strahlstrom I_B bis zu mehreren Hundert mA, sodass eine maximale Strahlleistung im Bereich zwischen 5 und 50 kW erreicht wird.

Mit der Fokussierung des Elektronenstrahls durch das sich aufgrund des Linsenstroms (I_L) ausbildende Magnetfeld sind minimale Fokusdurchmesser von bis fast 0,1 mm erreichbar. Eine kleine Änderung des Linsenstroms variiert die Fokusslage in Richtung der Strahlachse. In Bezug auf die Werkstückoberfläche kann der Elektronenstrahl somit überfokussiert (Fokuspunkt ist über der Werkstückoberfläche), fokussiert (Fokuspunkt ist auf der Werkstückoberfläche) und unterfokussiert (Fokuspunkt ist unter der Werkstückoberfläche) eingestellt werden. Hierbei ändert sich der Strahldurchmesser und in der Folge auch die Leistungsdichte im Bereich des Strahlauffreffpunktes. Die Leistungsdichte bestimmt die im Fokus ablaufenden Prozesse und insbesondere die Ausbildung einer Dampfkapillare beim Tiefschweißen (SCHULTZ 2000).

2.6.5 Potenziale des Elektronenstrahls in Bezug auf das EBM

Die Potenziale des Elektronenstrahls in der generativen Fertigung für das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) beruhen auf den beschriebenen Eigenschaften hinsichtlich des Energiestrahls, der Strahlablenkung und der Wechselwirkungen mit verschiedenen metallischen Werkstoffen (vgl. Abbildung 24).

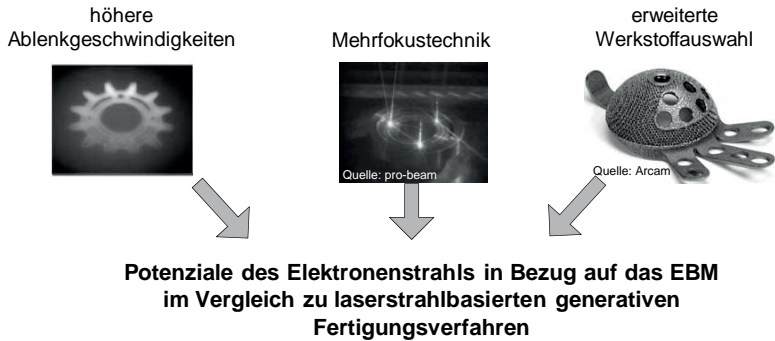


Abbildung 24: Potenziale des Elektronenstrahls in Bezug auf das EBM

Hierbei zeigte SIGL (2008) in seinen Untersuchungen, dass unterschiedliche Legierungen aus verschiedenen metallischen Gruppen prozesssicher verarbeitet werden können. Dies gilt auch für mit der Energiequelle Laser schwer aufzuschmelzenden Werkstoffe wie z. B. Kupfer (SIGL 2008) oder Titan (HEINL ET AL. 2007). Des Weiteren kann die nahezu trägheitslose Ablenkung des Elektronenstrahls mit elektromagnetischen Spulen für im Vergleich zur Ablenkung mit Spiegelgalvanometern schnellere und genauere Ablenkbewegungen des Strahlfokus eingesetzt werden (LUTZMANN ET AL. 2006).

Die Möglichkeit, den Elektronenstrahl sehr schnell und präzise abzulenken, bietet für elektronenstrahlbasierte Fertigungsverfahren darüber hinaus noch das grundsätzliche Potenzial, durch eine entsprechende Wahl der Ablenkdistancen mit den entsprechenden Verweilzeiten den Strahl in mehrere Fokuspunkte aufzusplitten. Das bedeutet, dass der Strahl schnell von einem Bearbeitungspunkt zum nächsten springt und dort definiert verweilt. Bei einem hinreichend schnellen Ablenken zwischen den Bearbeitungspunkten und einer hinreichend langen Verweilzeit am jeweiligen Bearbeitungspunkt erfährt das Werkstück mehrere unabhängige Fokuspunkte. Diese Fokuspunkte können den gleichen Prozess (Mehrbad- bzw. Mehrfeldtechnik) oder auch verschiedene Bearbeitungsaufgaben (Mehrprozesstechnik) ausführen (ZENKER 2003). Am Beispiel des Elektronenstrahlschmelzens bedeutet dies, dass mehrere Fokuspunkte entweder zum lokalen Aufschmelzen oder aber zum gleichzeitigen Vorheizen, Aufschmelzen und Nachwärmen genutzt werden können.

2.7 Das Elektronenstrahlschmelzen (EBM)

2.7.1 Allgemeines

Der grundsätzliche Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens (EBM) ist dem der laserstrahlbasierten generativen Verfahren ähnlich. Jedoch erfordern Strahl-Stoff-Wechselwirkungen zwischen dem Elektronenstrahl und dem Metallpulver Maßnahmen zur Vermeidung mehrerer physikalischer Effekte. Insbesondere ist das Ereignis des plötzlichen, unkontrollierten Verspritzens der Pulverpartikel unter der Einwirkung des Elektronenstrahls zu nennen. Dies wird im Folgenden analysiert und innerhalb der Untersuchungen detailliert erläutert (siehe Abschnitt 2.7.2). Der daraus resultierende Prozessablauf wird in Abschnitt 2.7.3 vorgestellt. Abschließend erfolgt in Abschnitt 2.7.4 eine Bewertung und Einordnung verschiedener Untersuchungen zur elektronenstrahlbasierten generativen Fertigung.

2.7.2 Physikalische Effekte

Bei einer unangepassten Prozessführung tritt der im letzten Abschnitt beschriebene physikalische Effekt des Verspritzens der Pulverpartikel auf. Geschieht dies im Verlauf des Bauprozesses, so wird die zuletzt aufgebrauchte Pulverschicht zerstört und der gesamte Bauprozess muss wiederholt werden. In Abbildung 25 ist hierzu eine mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommene Bilderfolge des Verspritzens einer Pulverschicht zu sehen.

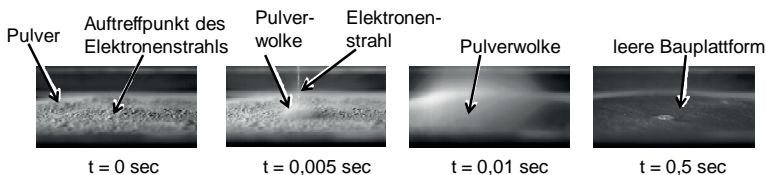


Abbildung 25: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der plötzlichen Dislokation von metallischem Pulver unter Einwirkung des Elektronenstrahls (ZÄH & KAHNERT 2006)

Nach KAHNERT ET AL. (2007), SIGL (2008), SIGL ET AL. (2006) und ZÄH (2007), kommen verschiedene physikalische Wirkprinzipien als Ursache des beschriebenen Effekts in Betracht, welche hinsichtlich ihres Einflusses auf diesen untersucht wurden. Eine Überprüfung fand hinsichtlich der Impulsübertragung aufgrund der hohen kinetischen Energie der beschleunigten Ladungsträger, elektro-

statischer Kräfte, thermodynamischer Effekte und elektrodynamischer Kräfte statt. Durch einen Vergleich auf der Basis von theoretischen Analysen zur Größenordnung der jeweils wirkenden Kräfte gelang es, die elektrostatische Aufladung als Hauptursache zu identifizieren (SIGL ET AL. 2006). Hohe elektrische Widerstände an den Kontaktstellen der Pulverkörner, die ein Abfließen der Ladungsträger verhindern, verursachen diese elektrostatische Aufladung. Für eine Größenabschätzung kann auf die Berechnung der entstehenden Kräfte bei der Abstoßung zweier gleich geladener Kugeln zurückgegriffen werden. Als Annahme werden hier ideal runde Pulverkörner ($d_K = 60 \mu\text{m}$) aus Stahl ($\rho_{\text{St}} \approx 7,8 \text{ kg/dm}^3$) vorausgesetzt, die durch Oxidschichten teilweise gegeneinander isoliert sind. Die Stromstärke ($I_B = 1 \text{ mA}$) des Elektronenstrahls ist über den aufgeweiteten Fokuspunkt ($d_F = 0,4 \text{ mm}$) gleich verteilt und der Anteil der auf dem Korn verbleibenden Elektronen ist $\eta = 1 \%$. Bei einer Ablenkgeschwindigkeit von $v = 10 \text{ m/s}$ überstreicht der Strahl das Pulverkorn in ca. $t = 4,6 \times 10^{-5} \text{ s}$. Die elektrische Ladung (Q_K) eines Pulverkorns lässt sich mit diesen Angaben über die Beziehung

$$Q_K = \eta \cdot I \cdot t = \left(\frac{d_K^2}{d_F^2} \right) \cdot I_B \cdot t = 0,01 \cdot \left(\frac{0,06^2 \text{ mm}^2}{0,4^2 \text{ mm}^2} \right) \cdot 1 \text{ mA} \cdot 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ s} = 1,03 \cdot 10^{-11} \text{ C} \quad (1)$$

bestimmen. Über das Coulomb'sche Gesetz können die abstoßenden Kräfte (F_{el}) zweier gleich großer, gleich geladener und nah beieinanderliegender Kugeln bzw. Körner berechnet werden:

$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_K^2}{d_K^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(1,03 \cdot 10^{-11} \text{ As})^2}{(60 \mu\text{m})^2} = 2,67 \cdot 10^{-4} \text{ N} \quad (2)$$

Diese Kraft ist um Zehnerpotenzen größer als die Gewichtskraft (F_K) eines Pulverpartikels

$$F_K = m_K \cdot g = \sigma_{\text{St}} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_K}{2} \right)^3 \cdot g = 7,8 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{60 \mu\text{m}}{2} \right)^3 \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 8,7 \cdot 10^{-9} \text{ N}, \quad (3)$$

sodass überwiegend elektrostatische Kräfte den Effekt des plötzlichen Verspritzens initiieren. Die elektrostatische Aufladung als Hauptursache wird von LUTZMANN (2010) bestätigt. Weiterhin führen SIGL (2008) und LUTZMANN (2010) aus, dass mechanische, elektrodynamische oder thermodynamische Effek-

te nur einen begrenzten Beitrag zum unkontrollierten Verspritzen der Pulverpartikel leisten.

2.7.3 Prozessschritte beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)

Der in Abbildung 26 dargestellte Prozessablauf zum lokalen Aufschmelzen einer Schicht mit dem Elektronenstrahl ist grundlegend ähnlich der allgemeinen Vorgehensweise (siehe Abschnitt 1.2.1), wie sie bei laserstrahlbasierten Anlagen bereits umgesetzt ist. Aufgrund der im vorigen Abschnitt beschriebenen instationären physikalischen Effekte ist jedoch ein zusätzlicher Prozessschritt zur Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit des metallischen Pulvers erforderlich. Daher ergibt sich der dargestellte Verfahrensablauf mit den folgenden grundlegenden Prozessschritten (HEINL ET AL. 2007, ZÄH & KAHNERT 2006):

- Pulverauftrag
- Vorheizen
- Verfestigen

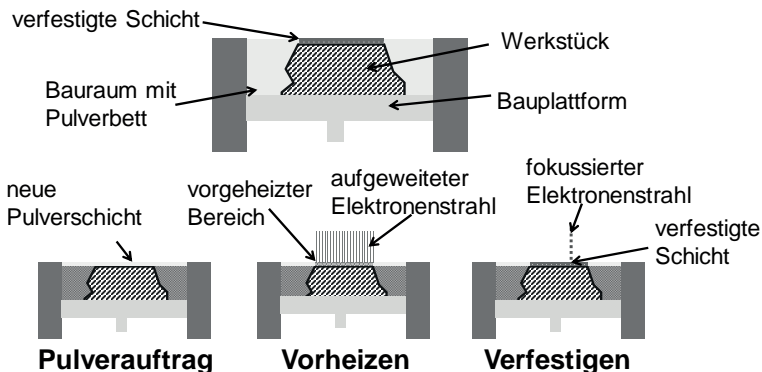


Abbildung 26: Erforderliche Prozessschritte beim Elektronenstrahlschmelzen (ZÄH & KAHNERT 2006)

Ein stark aufgeweiteter und defokussierter Elektronenstrahl führt den vor dem Verfestigen stattfindenden, zusätzlichen Prozessschritt des Vorheizens des Pulvers durch. Als Stromstärke wird der Wert eingestellt, bei dem die Ladungsträger trotz des vergleichsweise hohen elektrischen Widerstands zwischen den Pulverpartikeln noch gut zur Erdung hin abfließen können. Die Pulverpartikel erhitzen sich und erste Sinterhalse entstehen. Dies ist die Folge der angestrebten Reduktion der Grenzflächenenergie zwischen den einzelnen Partikeln als Vorstadium

im Sinter- bzw. Schmelzprozess. Durch eine Annäherung der Werkstoffparameter an Werte von Vollmaterial ist eine bessere elektrische wie auch thermische Leitfähigkeit zu beobachten. Ein höherer Strahlstrom ist zulässig, sodass eine bessere Energieeinbringung erreicht wird. Ab einer Pulvertemperatur von ca. 1000 °C für Stahl ist ein lokales Aufschmelzen und Verfestigen des Pulvers mit einem fokussierten Elektronenstrahl möglich (ZÄH & KAHNERT 2006).

2.7.4 Der Elektronenstrahl in der generativen Fertigung

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Grundlagen hinsichtlich Anlagenaufbau, Scanstrategien, Eigenschaften des Elektronenstrahls und Prozessführung beschreiben den schichtweisen Fertigungsprozesses Elektronenstrahlschmelzen (EBM). Aufgrund dieser Ausführungen ist es sinnvoll, dieses Verfahren in Anlehnung an die VDI-Richtlinie VDI 3404 (2009) in die Gruppe der Strahlschmelzverfahren einzuteilen. Die bisher synonym genutzte Bezeichnung *Elektronenstrahlsintern* (EBS; vgl. ZÄH 2007) wird daher für diese Arbeit durch den Begriff *Elektronenstrahlschmelzen* ersetzt.

Grundlegend beschreibt Larson im SCHUTZRECHT WO1994026446A1 (1994) die Nutzung des Elektronenstrahls im Rahmen der generativen Fertigung. Wesentliche Untersuchungen hinsichtlich der Eignungsbewertung dieser Energiequelle für die generative Fertigung führte DAVÉ (1995) durch. Er betrachtete hierbei vor allem neue Verfahrensansätze hinsichtlich der Werkstoffzufuhr. Die beiden prinzipiellen Möglichkeiten der Zufuhr eines drahtförmigen Werkstoffs sowie das selektive Verschmelzen pulverförmiger Werkstoffe wurden aufgezeigt. Die dabei eingesetzten Materialien waren primär Edel- und Werkzeugstähle sowie Aluminium-Nickel-Bronze-Legierungen (DAVÉ 1995, DAVÉ ET AL. 1995). Entwicklungen der amerikanischen Raumfahrtagentur NASA beschränkten sich zunächst auf drahtgebundene Aluminiumlegierungen für den Einsatz in Bereichen der Raumfahrt wie bspw. AA 2219 (TAMINGER & HAFLEY 2002, TAMINGER ET AL. 2004), wobei der Fokus dieser Arbeiten auf eine zukünftige Nutzung der elektronenstrahlbasierten generativen Fertigung zur Bauteilherstellung bei Raumfahrtmissionen ausgerichtet ist (TAMINGER ET AL. 2002). Hinsichtlich des Einsatzes von metallischen Pulverwerkstoffen bestehen inzwischen Bestrebungen, verschiedene Eisen-, Aluminium-, Titan- oder Nickel-Basis-Legierungen zu qualifizieren (GOOD 2007).

In bisherigen Untersuchungen zum elektronenstrahlbasierten selektiven Verfestigen metallischer Pulverwerkstoffe wurden verschiedene Gesichtspunkte betrachtet. Meist dominierten Aspekte der Qualifikation verschiedener Werkstoffe bzw.

Analysen zu den resultierenden Eigenschaften bei verschiedenen Bauteilen. Bisher veröffentlichte Untersuchungen zeigten, dass die Möglichkeit besteht, eine Vielzahl von unterschiedlichen Legierungen selektiv mit dem Elektronenstrahl aufzuschmelzen. Als wichtigster Gesichtspunkt muss hierbei die grundlegende Eignung des Werkstoffs für das Elektronenstrahlschweißen genannt werden. So neigen Legierungen mit Elementen, die im Bereich des jeweiligen Schmelzpunktes einen hohen Dampfdruck besitzen, zum Ausgasen in einer Vakuumumgebung und sind daher nur bedingt einsetzbar (DAS 2001). Es wurden bereits verschiedene Pulver aus Werkzeug- und Edelmetallen für die generative Fertigung mit dem Elektronenstrahl als Energiequelle qualifiziert, z. B. der Werkzeugstahl H13 bzw. 1.2344 (CORMIER ET AL. 2003, CORMIER 2005), 1.2343 (SIGL 2008), 316L bzw. 1.435 (QI ET AL. 2006) oder Kobalt-Chrom-Legierungen (ARCAM 2010, FIT 2011). Weitere Veröffentlichungen beschreiben auch den Einsatz verschiedener Legierungen aus Leichtmetallen, z. B. Titanlegierungen (HEINL ET AL. 2007, HARRYSSON ET AL. 2003) oder Aluminiumlegierungen (MAHALE ET AL. 2007). SIGL (2008) zeigte zudem die grundsätzliche Prozessfähigkeit weiterer Werkstoffe, wie Kupfer (Cu), leicht oxidiertes Kupfer (Cu *low-ox*), stark oxidiertes Kupfer (Cu *hi-ox*), Kupfer-Nickel-Legierungen (CuNi) oder Eisen-Nickel-Legierungen (FeNi).

Als beispielhafte Einsatzgebiete von Bauteilen, welche mit der Energiequelle Elektronenstrahl generativ hergestellt wurden, sind die Bereiche der Medizintechnik oder des Werkzeug- und Formenbaus zu nennen. RÄNNAR ET AL. (2007) zeigten den Nutzen eines mittels Elektronenstrahlschmelzen hergestellten komplexen Bauteils für einen Spritzgussformeinsatz auf. Die Potenziale des Werkstoffs Titan und während des Prozesses einstellbarer Gitterstrukturen, z. B. für die Medizintechnik, stellen HEINL ET AL. (2007) dar.

Im Vergleich hierzu beschreibt MEINDL (2005) allgemein eine Vorgehensweise zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren. In diesem Zusammenhang stellt er im Speziellen auch ein für das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) adaptiertes Kennzahlensystem vor, mit welchem Versuchsergebnisse bewertet und so Prozesseigenschaften abgeleitet werden können. SIGL (2008) wandte ein System für die Entwicklung generativer Fertigungsverfahren an. Hierbei zeigte er, dass für die Verfahrensentwicklung des EBM eine Unterteilung in verschiedene Teilsysteme (siehe Abbildung 27) erforderlich ist. Aus den drei Hauptbereichen *Energie/Elektronenstrahl*, *Stoff/Metallpulver* und *Information/Prozesssteuerung* sowie den kombinierten Bereichen *Strahl-Stoff-Wechselwirkungen*, *Scanstrategie* und *Materialbereitstellung* lassen sich für eine weitere Entwicklung die Haupt-handlungsfelder ableiten. Hinsichtlich der *Strahl-Stoff-Wechselwirkungen* analy-

sierte LUTZMANN (2011) die auftretenden physikalischen Effekte und leitete daraus ein Prozessmodell für das Elektronenstrahlschmelzen ab.

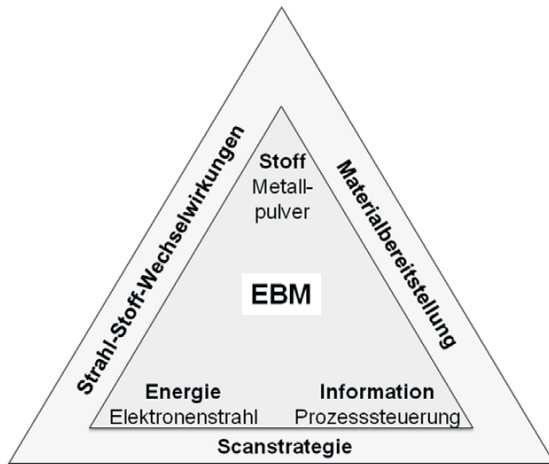


Abbildung 27: Teilsysteme des Elektronenstrahlschmelzens nach SIGL (2008)

2.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für das EBM

Kapitel 2 befasste sich zunächst mit der Definition eines einheitlichen Verständnisses für den Begriff Scanstrategien in der generativen Fertigung. Auf der Basis einer Analyse der beschriebenen Begrifflichkeiten in verschiedenen Publikationen wurde die Gesamtheit aller Merkmale einer Scanstrategie herausgearbeitet und systematisch aufbereitet. Die dabei bestimmten Hauptbestandteile einer Scanstrategie sind das Scanmuster sowie die Strahlparameter. Im Weiteren wurden die jeweiligen Funktionsweisen laser- und elektronenstrahlbasierter Anlagen beschrieben. Daran anschließend erfolgte eine Analyse von in kommerziellen Anlagen bereits implementierten bzw. in Veröffentlichungen untersuchten Scanstrategien hinsichtlich ihrer Eigenschaften und des möglichen Einsatzes beim Elektronenstrahlschmelzen. Hierbei ist vor allem durch neue Scanstrategien eine deutliche Qualitätssteigerung zu erwarten. Auch konnte durch das Charakterisieren der Eigenschaften der Energiequelle *Elektronenstrahl* ein hohes Potenzial für das selektive Aufschmelzen metallischer Werkstoffe abgeleitet werden. Neue und angepasste Scanstrategien in Kombination mit der Energiequelle Elektronenstrahl ermöglichen somit ein effektives Vorgehen, um das Elektronenstrahlschmelzen weiterzuentwickeln und in der Produktionstechnik einzusetzen.

2.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für das EBM

Basierend auf der Zielsetzung der Arbeit sollen die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung im Folgenden genutzt werden, um eine systematische Beschreibung und eine Bewertung sowie Auswahl für das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) neuartiger Scanstrategien zu ermöglichen.

Dabei ist zunächst eine allgemeine Methodik für die Beschreibung von Scanstrategien aufzustellen und diese auch in einer softwarebasierten Lösung umzusetzen. Die hierzu erforderlichen und durchgeführten Modifikationen an einer Elektronenstrahl-Universalkammeranlage ermöglichen die Analyse der Eigenschaften ausgewählter Scanstrategien. Auch wird eine an die jeweiligen Phasen angepasste Auswahl von Vorgehensweisen beschrieben. Für die Methodik zur Ermittlung von Scanstrategien werden insbesondere solche zur Beherrschung der Aufgabenkomplexität adaptiert. Im Gegensatz hierzu kommen für die Prozessuntersuchungen systematische Herangehensweisen zum Einsatz, welche eine Ableitung von Parameterzusammenhängen ermöglichen. All dies wird im nachfolgenden Kapitel 3 erläutert.

3 Beschreibungsmethodik für Scanstrategien

3.1 Allgemeines

Im Rahmen der Einführung und der Darstellung des Standes der Technik wurde erläutert, dass vielfältige, durch den Benutzer bestimmte oder allgemeine Einflussfaktoren auf den Prozess des Elektronenstrahlschmelzens wirken. Wie Abbildung 28 zeigt, müssen z. B. Aspekte des Bauteils bzw. der Bauteilgeometrie, der beabsichtigten Anwendung und des eingesetzten Werkstoffs sowie Qualitätsanforderungen berücksichtigt werden. Zur Erfüllung dieser Anforderungen hinsichtlich Bauteilqualität, Bauteilkosten, Prozesssicherheit oder Produktivität ist die Scanstrategie innerhalb des Elektronenstrahlschmelzens als ein zentraler Punkt zu betrachten. Mit der zu adaptierenden Prozesssteuerung bzw. zu der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage als Fertigungssystem bestehen Wechselwirkungen, da die Scanstrategien einerseits in der Steuerung abgebildet und auch andererseits durch Anlagenanpassungen umgesetzt werden müssen.

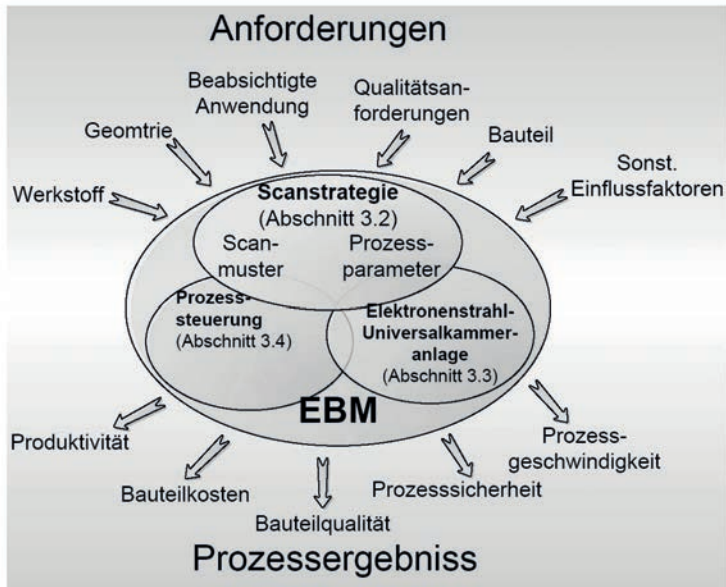


Abbildung 28: Anforderungen und Auswirkungen auf das Prozessergebnis des Elektronenstrahlschmelzens

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

In Abschnitt 3.2 wird daher zunächst auf eine allgemeine Beschreibungsmethodik für Scanstrategien im Rahmen des Elektronenstrahlschmelzens eingegangen, welche insbesondere auch die Scanmuster mit *Outlining* und *Hatch* (Definitionen siehe Abschnitt 2.2) sowie die Prozessparameter beinhaltet. Daneben ist eine Vorgehensweise für eine systematische Lösungsraumeinschränkung zur Auswahl der geeignetsten Scanstrategie Inhalt dieses Abschnitts. Abschnitt 3.3 beschreibt die notwendigen Funktionserweiterungen der adaptierten Elektronenstrahl-Universalkammeranlage, um die erarbeitete Methode umsetzen zu können. Darauf basierend erfolgt deren Integration in einem Tool zur automatischen softwareunterstützten Erzeugung von Scanstrategien (siehe Abschnitt 3.4). Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten in Abschnitt 3.5.

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

3.2.1 Allgemeines

Durch die zu entwickelnde Methode soll eine systematische und vergleichbare Beschreibung von Scanstrategien erreicht werden, die alle potenziellen Einflussfaktoren als Beschreibungselemente umfasst bzw. um neue ergänzt werden kann. Eine solche systematische Beschreibung ist erforderlich, um für weitere Entwicklungsschritte aufwandsarm neue Scanstrategien zu generieren und eine vergleichbare Bewertung unterschiedlicher Scanstrategien zu ermöglichen. Hierbei zeigen die im Kapitel zum Stand der Forschung und Technik (siehe Abschnitt 2.5) beschriebenen und bisher bei direkten strahlbasierten generativen Fertigungsverfahren eingesetzten Scanstrategien, dass geometrische Aspekte wie auch weitere Prozessparameter auf die Qualität der zu erzeugenden Schicht und somit des herzustellenden Bauteils einwirken. Die in Abbildung 29 dargestellte Übersicht der wichtigsten bei der Definition einer Vorgehensweise zur Beschreibung von Scanstrategien zu berücksichtigenden Einflussfaktoren verdeutlicht nochmals deren Vielschichtigkeit.

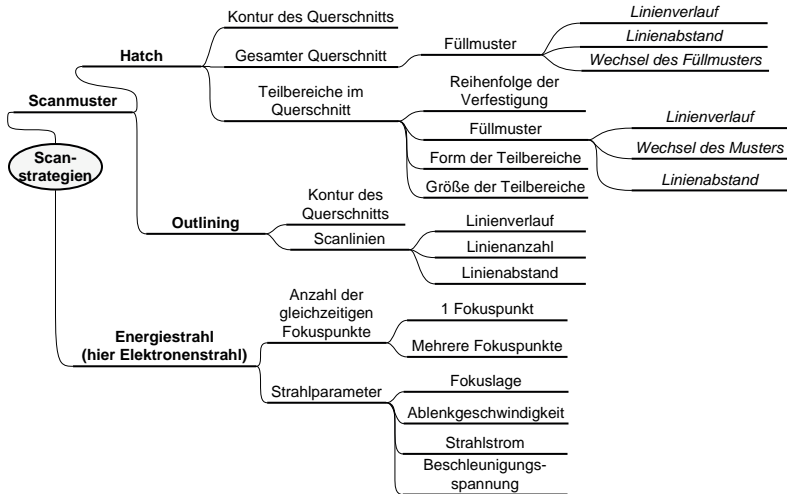


Abbildung 29: Übersichtsdiagramm der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Wirkung einer Scanstrategie

Die Verschiedenartigkeit der bestimmenden Einflussfaktoren, wie z. B. die den Elektronenstrahl beschreibenden Parameter oder die Eigenschaften des Scanmusters, sowie die in den Teilbereichen enthaltenen mehrstufigen Zusammenhänge ergeben vielschichtige Abhängigkeiten. Durch die im Rahmen der Arbeit zu entwickelnde Vorgehensweise sollen insbesondere diese komplexen Abhängigkeiten in eine systematische Methodik zur Beschreibung einer Scanstrategie übergeführt werden. Auf die Darstellung des Elektronenstrahlschmelzens wird in dieser Übersicht im Speziellen durch die Aufnahme spezifischer, den Elektronenstrahl charakterisierender Elemente, wie bspw. Beschleunigungsspannung oder Strahlstrom, eingegangen. Jedoch ist es grundsätzlich auch möglich, diese mit den Laserstrahl kennzeichnenden Kennwerten zu ersetzen, wenn die Methodik auf laserstrahlbasierte Verfahren angewendet werden soll.

Die Vorgehensweise zur Methodenentwicklung und -umsetzung für die Beschreibung von Scanstrategien beinhaltet daher in Abschnitt 3.2.2 zunächst eine Anforderungsanalyse und die Auswahl sowie Bewertung verschiedener Methoden zur Beschreibung technischer Zusammenhänge. Die ermittelten Informationen dienen in Abschnitt 3.2.3 dazu, eine systematisierte grafische Darstellung zu erarbeiten. Die Abschnitte 3.2.4 bzw. 3.2.5 zeigen die Umsetzung und den exemplarischen Einsatz der entwickelten Methode beim Elektronenstrahlschmelzen auf. Im Weiteren werden in Abschnitt 3.2.6 der potenzielle Lösungsraum und

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

in Abschnitt 3.2.7 Vorgehensweisen zu dessen systematischer Einschränkung erläutert.

3.2.2 Anforderungen an eine Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

Die Verschiedenartigkeit der Einflussfaktoren sowie deren mehrstufige Abhängigkeiten erfordern eine zielgerichtete Erfassung und Beschreibung der jeweiligen Zusammenhänge. Um zur Darstellung von Scanstrategien verschiedener Varianten sowie der Abhängigkeiten eine passende Vorgehensweise ableiten zu können, ist zunächst eine Aufstellung der Anforderungen notwendig. Für die Darstellung des Aufbaus von Scanstrategien in einer Beschreibungsstruktur ergeben sich folgende Anforderungen:

- hierarchischer Aufbau der Beschreibungsstruktur
- Kombination von Merkmalen
- Einteilung der Objekte in Attribute und Funktionen
- Möglichkeit, ein Objekt in weitere Objekte zu unterteilen
- Struktur mit eindeutiger Richtung
- Granulierung wie auch Verdichtung von Informationen (Verzweigung wie auch Vereinigung möglich)
- Erweiterbarkeit der Beschreibungsstruktur

Der hierarchische Aufbau der Beschreibungsstruktur ist aufgrund der vielfältigen Merkmale einer Scanstrategie bzw. eines Scanmusters wichtig, um deren vertikale Abhängigkeiten aufzeigen zu können. Im Weiteren ist die Festlegung von Scanstrategien durch die Kombination unterschiedlicher Merkmale vorzusehen. Diese Merkmale sind in Objekte mit den zugehörigen Attributen zu unterteilen, wobei diese wiederum zu Objekten einer niedrigeren Hierarchiestufe umgewandelt werden können. Hierfür ist eine eindeutige Richtung mit der Möglichkeit, die Informationen sowohl zu granulieren als auch zu verdichten, vorzugeben. Allgemein ist eine Erweiterbarkeit der zu definierenden Beschreibungsstruktur unabdingbar.

Im Bereich der Beschreibung komplexer Zusammenhänge existieren bereits unterschiedliche Lösungsansätze. Je nach Aufgabenstellung, bspw. Verknüpfung von Prozessen, Auswahl verschiedener Lösungsalternativen, Darstellung hierarchischer Abhängigkeiten oder Eigenschaftszuordnung, können jeweils spezialisierte Vorgehensweisen ausgewählt werden. Bezüglich der allgemeinen Be-

schreibung von Scanmustern bzw. -strategien gibt es jedoch keine, die alle im vorigen Abschnitt genannten Anforderungen erfüllt. Mögliche bereits existierende Vorgehensweisen, die Teilbereiche abdecken, sind u. a.

- der morphologische Kasten,
- die Objektorientierung,
- die Baumstruktur,
- die ereignisgesteuerte Prozesskette und
- das Wertschöpfungskettendiagramm.

Der *morphologische Kasten* ist das Werkzeug der morphologischen Analyse, einer Kreativitätstechnik, und dient vor allem zur Darstellung der Gesamtheit aller denkbaren Lösungen (LINDEMANN 2005). In einer ersten analytischen Phase werden die Merkmale der Aufgabe erfasst und in einer tabellarischen Form untereinandergeschrieben. Dabei ist darauf zu achten, dass sie relevant, unabhängig, operationalisierbar, vollständig und für alle denkbaren Lösungen zutreffend sind. Diesen Merkmalen werden zeilenweise alle denkbaren Ausprägungen zugeordnet. Für die Lösungsfindung wird aus jeder Zeile eine Ausprägung gewählt und es werden diese Ausprägungen miteinander zu einer Lösungsalternative verknüpft. Wesentlich für die hier zu bestimmende Beschreibungsmethodik von Scanstrategien ist die Möglichkeit, Teillösungen z. B. bezgl. des *Hatches* oder des *Outlinings* zu einer Gesamtlösung zu kombinieren. Ebenso kann durch den beschriebenen Aufbau des morphologischen Kastens eine Unterteilung in Attribute und Funktionen erfolgen.

Die *Objektorientierung* stammt aus der Entwicklung von Software, ist eine Programmiermethode und verfolgt den Ansatz, Eigenschaften und Funktionen gemeinsam zu betrachten. Sie besteht aus den drei Basiswerkzeugen Datenkapselung, Polymorphie und Vererbung (LAHRES & RAYMAN 2006). Datenkapselung bedeutet, dass Daten explizit einem Objekt zugeordnet sind und so der Zugriff durch andere Programnteile nur über eine Schnittstelle mit dem Objekt möglich ist. Die Polymorphie (Vielseitigkeit) erlaubt es, dass Eigenschaften eines Objekts referenziert werden können, ohne dessen konkrete Ausprägung oder Funktionen zu kennen, da das Objekt über eine Schnittstelle mit dem Gesamtsystem kommuniziert. So können Objekte leicht gegen effizientere ausgetauscht oder um neue erweitert werden. Das dritte Grundelement der Objektorientierung ist die Vererbung. Diese lässt zu, dass Objekte von Objekten abgeleitet werden können und damit die Attribute bzw. Funktionen des Basisobjekts erben. In der Regel unterliegen die durch das Prinzip der Vererbung generierten Objekte einer hierarchi-

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

schen Struktur. Die Ausführungen zeigen, dass die Objektorientierung im Rahmen der Vorgehensweise zur Beschreibung von Scanstrategien genutzt werden kann. Insbesondere die Einteilung in Objekte mit den zugehörigen Attributen und Funktionen wie z. B. für die Beschreibung von Teilbereichen inkl. der Eigenschaftsvererbung ist hierdurch möglich. Auch ist hierdurch die Erweiterbarkeit der zu definierenden Beschreibungsstruktur sichergestellt.

Die wesentliche Eigenschaft einer *Baumstruktur*, die Darstellung hierarchischer Abhängigkeiten, ist auch für die zu entwickelnde Methode relevant. Insbesondere die hierdurch erreichbare gute Übersichtlichkeit der Struktur wird in der Folge für die Beschreibung von Scanstrategien umgesetzt.

Eine *ereignisgesteuerte Prozesskette* wird durch Ereignisse, Funktionen und Verknüpfungsoperatoren bestimmt. Die einfachste Prozesskette beginnt mit einem Ereignis und endet nach dem Ausführen einer Funktion wieder mit einem Ereignis. Über Verknüpfungsoperatoren lässt sich die Prozesskette verzweigen und auch wieder vereinigen. Ereignisgesteuerte Prozessketten bieten durch ihren modularen Aufbau mit Grundelementen eine hohe Freiheit in der Darstellung auf der Zeichenfläche. Dadurch lassen sich alternative und parallele Abläufe übersichtlich und anschaulich darstellen. Die genannte Eigenschaft ist für eine Darstellung alternativer Scanstrategien erforderlich, sodass diese im Rahmen der Methode zur Beschreibung von Scanstrategien genutzt wird. Abbildung 30 zeigt die Bewertung und Auswahl dieser Vorgehensweisen hinsichtlich ihrer jeweiligen Anforderungserfüllung.

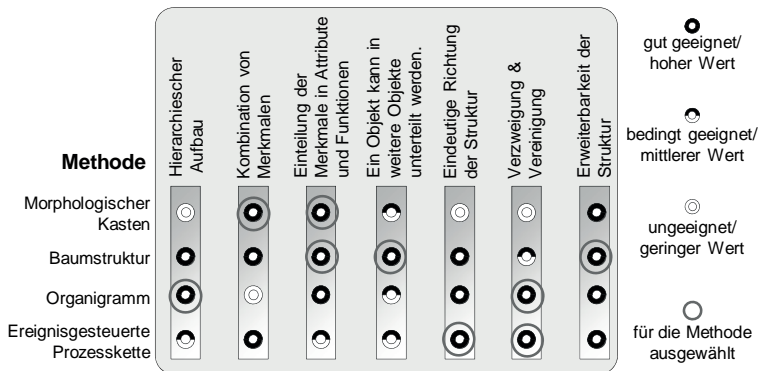


Abbildung 30: Gegenüberstellung der beschriebenen Anforderungen mit existierenden Methoden hinsichtlich eines Einsatzes für die zu entwickelnde Vorgehensweise

3.2.3 Elemente zur Beschreibung von Scanstrategien

3.2.3.1 Informationsebenen für die Beschreibung von Scanstrategien

Da Art und Umfang der Inhalte verschiedener Elemente zur Beschreibung von Scanstrategien stark variieren, müssen diese verschiedenen Abstraktionsebenen zugeordnet werden. Die grundlegenden Entscheidungen, ob und wie bspw. das *Outlining* ausgeführt wird, zeigen die Füllung eines Querschnitts durch Vorgabe u. a. des *Hatch*musters auf, geben die Werte für verschiedene Parameter vor und beschreiben abschließend die Anpassungen der Scanstrategie über mehrere Schichten. Für eine umfassende Beschreibung sind folgende Aspekte erforderlich:

- *Grundauswahl:*
Hierbei findet eine grundlegende Unterscheidung der Elemente einer Scanstrategie in die Geometriebereiche *Outlining* und *Hatch* (Verfestigung der Kontur bzw. des Querschnitts) sowie Elektronenstrahlparameter statt.
- *Merkmalsdefinition:*
Im Rahmen dieser Ebene erfolgt die Definition der Scanstrategie bzw. des zugehörigen Scanmusters durch die Auswahl der die Geometrie sowie den Elektronenstrahl charakterisierenden Elemente und Merkmale.
- *Parametrierungsbereich:*
In diesem Bereich werden die geometrischen Größen und Ausprägungen des Scanmusters, bspw. der Linienabstand, festgelegt. Auch findet die Definition der Prozessparameter, bspw. der Strahlleistung, statt.
- *Schichtübergreifende Informationen:*
In dieser Ebene werden Informationen, die für mehrere, aufeinander folgende Schichten von Belang sind, beschrieben. Ein Beispiel ist der Wechsel der Scanrichtungen bei *Hatch*linien in einer neuen Schicht.

3.2.3.2 Beschreibung von Scanstrategieelementen

Die einzelnen Elemente zur Beschreibung einer Scanstrategie lassen sich ähnlich wie Objekte mit zugehörigen Attributen und Funktionen auffassen. Diese Attribute und Funktionen bestimmen den Inhalt und die Ausprägungen der einzelnen Objekte. Sie können einen definierten Wert annehmen (z. B. Angabe des Wertes

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

für das Attribut Linienabstand) oder sie werden als eigenständige Objekte mit verschiedenen Attributen (z. B. das „Füllmuster“ als Element des Objekts „Teilbereiche im Querschnitt“) behandelt (siehe Abbildung 31). Das der Objektorientierung entlehnte Vorgehen stellt sicher, dass alle für die Beschreibung notwendigen Parameter zu einer Gesamtstrategie aufsummiert werden.

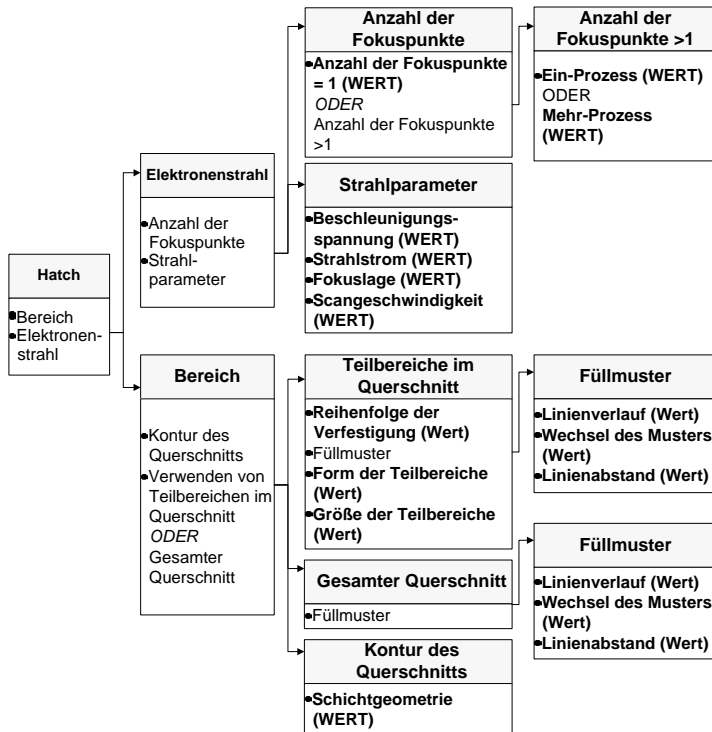


Abbildung 31: Beispielhafter Aufbau verschiedener Elemente einer Scanstrategie am Beispiel des Hatches

3.2.3.3 Verknüpfung der Elemente

Mit einer definierten Verknüpfung der Elemente können zwei Anforderungen an die Vorgehensweise zur Beschreibung von Scanstrategien erfüllt werden. Zum einen werden durch die Angabe einer Richtung (z. B. durch Pfeile) die Abhängigkeit und Hierarchisierung sowie die Reihenfolge zur Betrachtung der Teilelemente priorisiert. Zum anderen erfolgt bei Verzweigungen, wenn also mehrere

Teilelemente von einem übergeordneten Element abhängig sind, die Festlegung über den Umfang der zu betrachtenden Subelemente. Die folgenden drei Optionen sind zur Definition einer Verknüpfung möglich (siehe Abbildung 32):

- die *Konjunktion*, das „logische UND“ (*and*): Alle Subelemente müssen berücksichtigt werden.
- die *Adjunktion*, das „inklusive ODER“ (*or*): Es können ein oder mehrere Subelemente für die Erstellung einer Scanstrategie kombiniert werden.
- die *Disjunktion*, das „exklusive ODER“ (*xor*): Eine Entscheidung für ein Subelement muss getroffen werden.

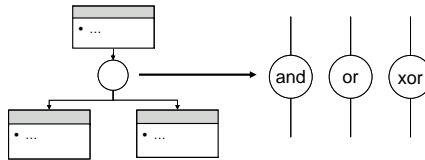


Abbildung 32: Verknüpfung verschiedener Elemente einer Scanstrategie

3.2.4 Umsetzung im Rahmen des Elektronenstrahlschmelzens

Mit den im vorigen Abschnitt vorgestellten Grundlagen zur Beschreibung von Scanstrategien werden im Folgenden die allgemeinen Zusammenhänge für das Elektronenstrahlschmelzen aufgezeigt (vgl. Abbildung 33). Dieses Diagramm stellt den Aufbau der Entscheidungsebenen dar. Hierbei werden grundlegende Angaben hinsichtlich der Merkmalsdefinition und Parametrierung der Strategien sowie verschiedene schichtübergreifende Angaben festgelegt.

Aufgrund des komplexen Aufbaus des Diagramms in den jeweiligen Teilbereichen erfolgt hier eine Übersichtsdarstellung. In den folgenden Abschnitten wird anhand der Teilbereiche *Outlining* und *Hatch* sowie der zugehörigen Strahlparameter der jeweilige Aufbau und das Zusammenwirken näher erläutert (siehe auch Abbildung 34 bis Abbildung 36). Ebenso ist das Diagramm im Anhang nochmals größer und vollständig abgebildet (vgl. Abschnitt 8.1).

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

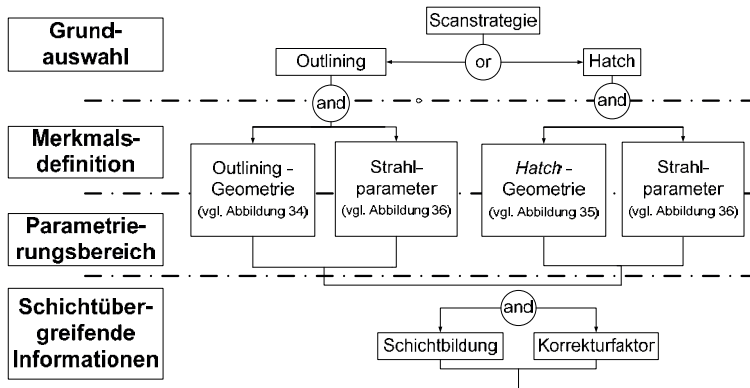


Abbildung 33: Diagramm zur allgemeinen Darstellung der Zusammenhänge bei Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) – vgl. auch die Darstellung mit einem höheren Detailierungsgrad in Abbildung 87 im Abschnitt 8.1

Das *Outlining* (siehe Abschnitt 2.2.2) wird als konturparalleles Scannen der Außenlinie des Bauteilquerschnitts beschrieben. Daher besteht nur die Möglichkeit, die Parameter der zugehörigen Scanlinien zu variieren. Wie in Abbildung 34 zu sehen ist, können für das Element „Scanlinien“ die Parameter Linienabstand, -anzahl und -verlauf verändert werden. Mit dem Linienabstand wird der Abstand (hier z. B. 0,2 mm, 0,3 mm ...) zwischen den Linien vom Bediener festgelegt und mit der Linienanzahl (hier z. B. 1, 2 ...) die Menge der Spuren für die Verfestigung des Schichtquerschnitts an der Außenkontur angegeben. Der Linienverlauf gibt die Richtung einer einzelnen Linie mit dem Drehsinn an. Ebenso kann bei mehreren Linien ein Wechsel der Scanrichtung durchgeführt werden. Neben den Scanlinien ist für die selektive Verfestigung auch der aktuelle Schichtquerschnitt relevant, da dieser die geometrischen Informationen des Bauteils enthält.

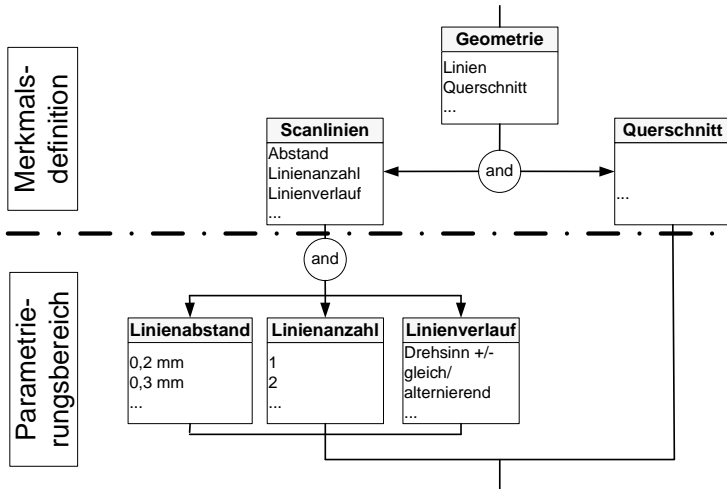


Abbildung 34: Beschreibungsstruktur des Bereichs Outlining

Die Beschreibung des *Hatches* zeigt im Vergleich zur Beschreibung des *Outlinings* eine deutlich größere Bandbreite an verschiedenen Ausprägungen des zugehörigen Scanmusters auf. Allgemein ist neben dem durch das Bauteil vorgegebenen Schichtquerschnitt für den *Hatchbereich* vor allem die Unterscheidung zwischen dem einheitlichen Scannen des gesamten Bereichs mit einem Füllmuster und der Definition verschiedener Teilbereiche innerhalb des Schichtquerschnitts zu treffen. Für beide Fälle ist jeweils das Füllmuster (z. B. *x-Hatch*, Spirale) auszuwählen. Bei der Option *Teilbereiche* sind im Weiteren noch die Form (z. B. Quadrat, Hexagon), die Größe abhängig von der Form, die Reihenfolge (z. B. durchlaufend, stochastisch) und ein eventueller Musterwechsel zu definieren. Das Festlegen von Parametern für die Beschreibung der Scanlinien, wie des Linienabstandes (hier z. B. 0,2 mm, 0,3 mm ...) oder der Richtung (hier z. B. Angabe des Drehsinns, gleiche oder alternierende Scanrichtungen), schließt die Gestaltung des *Hatchmusters* ab. Der zugehörige Aufbau ist in Abbildung 35 dargestellt.

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

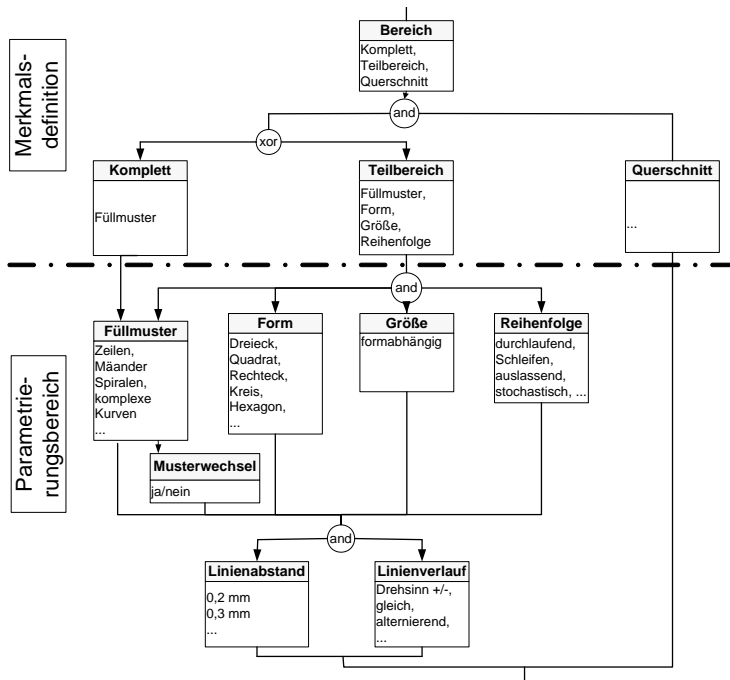


Abbildung 35: Beschreibungsstruktur des Bereichs Hatch

Für eine vollständige Beschreibung einer Scanstrategie ist es entscheidend, neben den Scanmustern auch, wie in Abbildung 36 dargestellt, eine umfassende Bestimmung der Prozessparameter durchzuführen. Hierbei sind zunächst die Anzahl der Fokuspunkte bzw. die Strahlparameter festzulegen. Den Haupteinfluss auf die Qualität der Schichtverfestigung üben vor allem die Strahlparameter wie z. B. die Ablenk- bzw. Scangeschwindigkeit, die Strahlleistung, die Fokuslage usw. aus. Diese Parameter können sowohl für laserstrahl- als auch für elektronenstrahlbasierte generative Verfahren variiert werden. Durch die schnelle Elektronenstrahlableitung besteht im Weiteren die prinzipielle Möglichkeit, mehrere unabhängige Fokuspunkte zu erzeugen. Dabei ändert die Strahlsteuerung bzw. -ablenkung die Position des Elektronenstrahls in weniger als 2 ns (PRO-BEAM 2007, ZENKER 2003), sodass das Bauteil mehrere unabhängige Fokuspunkte erfährt und so die sogenannte Mehrfokustechnik realisiert wird. Hierdurch ist es möglich, nicht nur wie beim Einsatz eines Strahls ausschließlich einen Prozess auszuführen, sondern es können mehrere Prozesse gleichzeitig ausgeführt werden, d. h. z. B. ein Fokuspunkt wärmt vor, ein Fokuspunkt verfestigt und ein

Fokuspunkt führt eine Oberflächenglättung durch. Der Elektronenstrahl kann auch so abgelenkt werden, dass mehrere Fokuspunkte den gleichen Prozess (hier das selektive Verfestigen) durchführen.

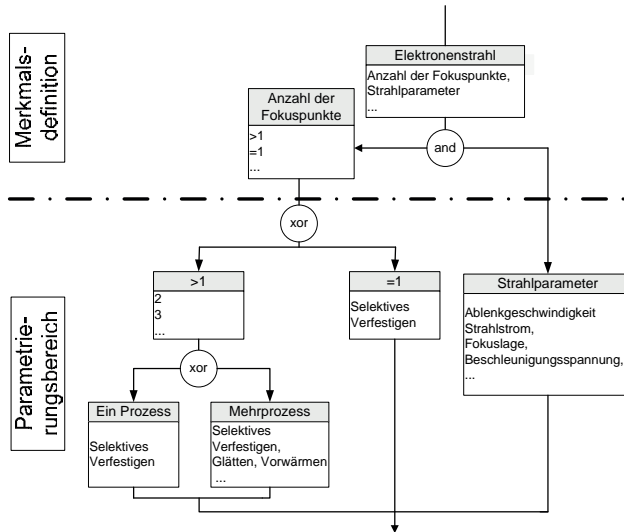


Abbildung 36: Beschreibungsstruktur des Bereiches Strahlparameter

3.2.5 Exemplarische Umsetzung

Im Rahmen der Zusammenführung werden die oben beschriebenen Teilbereiche zunächst geordnet und verbunden. Anschließend wird die Anwendung der Methode zur systematischen Erzeugung von Scanstrategien mittels der exemplarischen Erzeugung der Strahlablenkwege eines Schichtquerschnitts erläutert (siehe Abbildung 37). Besondere Berücksichtigung finden hierbei die beiden durch eine ODER-Verbindung gebildeten parallelen Äste des *Outlinings* und des *Hatches*. Zusammen ergeben diese die Hauptbereiche der Vorgehensweise für die Erzeugung von Scanmustern. Im Weiteren sind die zugehörigen Strahleigenschaften und -parameter Inhalt beider Äste. Diese müssen jedoch unabhängig von den geometrischen Aspekten betrachtet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden sie für die dargestellte schematische Abbildung nicht aufgeführt. Ein schichtübergreifender Gebrauch ist grundsätzlich möglich, wird aber für dieses Beispiel des Scanmusters einer Schicht nicht angewandt.

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

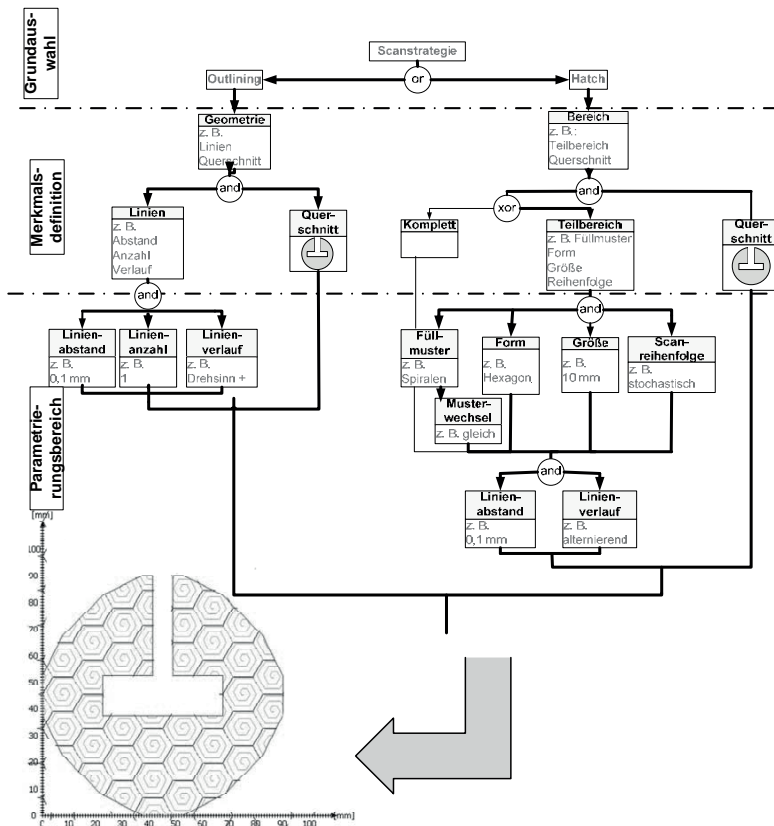


Abbildung 37: Exemplarische Erzeugung einer Scanstrategie

Dabei demonstriert der in Abbildung 37 gezeigte Querschnitt nochmals das Vorgehen zur Definition einer Strategie. Die gewählten Elemente und deren Verknüpfungen sind fett hervorgehoben. Zunächst wird in der Ebene der Grundauswahl festgelegt, dass sowohl das *Outlining* als auch der *Hatch* zu definieren sind. Für das *Outlining* wurde anhand der ausgewählten Schicht die Kontur bestimmt. Für diese wurden im parallelen Ast der Linienabstand, die Linienanzahl und der Drehsinn der Scanrichtung festgelegt. Im Parametrierungsbereich wurde im Rahmen dieses Beispiels für den Linienabstand der Wert 0,1 mm, für die Linienanzahl der Wert 1 und als Verlauf ein positiver Drehsinn gewählt. Die synchrone Bestimmung des *Hatches* fand anhand des gleichen Querschnitts statt. Dabei erfolgte in der Ebene der Merkmalsdefinition eine Unterteilung in Teilbereiche.

Die hierzu notwendigen Ausprägungen des Füllmusters, der Form, der Größe und der Scanreihenfolge wurden im Parametrierungsbereich definiert. Als Form der Teilbereiche wurde das Hexagon, als Größe der Wert 10 mm, als Füllmuster eine Spirale und eine stochastische Scanreihenfolge festgesetzt. Der Linienabstand für den *Hatch* beträgt 0,1 mm, der Linienverlauf ist alternierend.

3.2.6 Darstellung des potenziellen Lösungsraumes

Mit der in den vorangegangenen Abschnitten entwickelten Methodik steht nun ein effektives Werkzeug zur systematischen Erzeugung und Darstellung von Scanstrategien zur Verfügung. Beim Elektronenstrahl als Energiequelle können neben den aus laserstrahlbasierten Verfahren bekannten Strategien eine Vielzahl neuer, hier noch nicht beschriebener Strategien definiert werden. Vor allem die höheren Ablenkgeschwindigkeiten bei einer gleichzeitig hohen Ablenkgenauigkeit ermöglichen das prozesssichere Scannen dieser Muster mit dem Elektronenstrahl. Im Gegensatz hierzu verhindern die Masseträgheiten der Ablenkspiegel ein gleichzeitig schnelles und hochgenaues Scannen bei laserstrahlbasierten Verfahren. Für einen Vergleich der beiden Energiequellen sind in Tabelle 3 beispielhaft bisher aus der Literatur bzw. dieser Arbeit bekannte Formen des *Hatches* für ein effektives Scannen dargelegt. Berücksichtigt wurden eine potenzielle Unterteilung mittels Grundelementen, das zugehörige Füllmuster, die Reihenfolge des Scannens von Füllmustern und die Scanrichtung. Bedeutende Unterschiede ergeben sich insbesondere bei der Aufteilung des Schichtquerschnitts und bei den damit verbundenen Mustern. Die Reihenfolge des Scannens eines unterteilten Schichtquerschnitts ist für beide Ablenkssysteme gleich. Durch die Multiplikation der in Tabelle 3 angegebenen Anzahl der Einzellösungen zeigt sich, dass bei diesem Beispiel mit den hier exemplarisch ausgewählten Optionen der Lösungsraum für den Elektronenstrahl um den Faktor 10 größer ist.

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

	Laserstrahl	Elektronenstrahl
Aufteilung	Ganzer Querschnitt, Quadrat	Ganzer Querschnitt, Quadrat, Dreieck, Hexagon
<i>Anzahl</i>	2	4
Füllmuster	Zeilenförmig, konturangepasst	Zeilenförmig, Spirale, äquidistante Konturlinien, Hilbert-Kurve, Gosperkurve ...
<i>Anzahl</i>	2	5
Scanrichtung	Eine definierte Richtung	Richtungsänderung (v. a. für Spiralen oder Konturmuster)
<i>Anzahl</i>	1	2
Füllreihenfolge	Zeilenweise, stochastische Verteilung, Abstand vom Schwerpunkt ...	Zeilenweise, stochastische Verteilung, Abstand vom Schwerpunkt ...
<i>Anzahl</i>	5	5
Anzahl der Gesamtlösungen	20	200

Tabelle 3: Vergleich möglicher Ausprägungen des Hatches für elektronenstrahl- und laserstrahlbasierte Verfahren

In dieser Zusammenfassung wurden noch nicht alle potenziellen Einstellgrößen des Strahls, die Parametrierung von Linienabständen oder das *Outlining* berücksichtigt. Hieraus wird sich eine starke Vergrößerung des Lösungsraums ergeben. Um diese Vielfalt beherrschen zu können, sind im Weiteren Vorgehensweisen bzw. an das jeweilige Bauteil bzw. den Schichtquerschnitt angepasste Maßnahmen erforderlich. Dem Anwender soll ermöglicht werden, einerseits eine handhabbare, reduzierte Lösungsanzahl zu erhalten und andererseits darauf aufbauend eine für den jeweiligen Anwendungsfall optimierte Scanstrategie zu identifizieren.

3.2.7 Vorgehensweisen zur Einschränkung des Lösungsraums

3.2.7.1 Allgemeines

Die vorgestellte Vorgehensweise zur Beschreibung und Erzeugung von Scanstrategien ermöglicht es, eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen zu generieren. Diese Vielzahl macht jedoch eine systematische Reduzierung des Lösungsraums unumgänglich. In den folgenden Abschnitten wird hierzu die Funktion von Schranken zur Lösungsraumeinschränkung (Abschnitt 3.2.7.2) eingeführt und deren Anwendung (Abschnitt 3.2.7.3) erläutert.

3.2.7.2 Schranken zur Lösungsraumeinschränkung

Um die geforderte Einschränkung des Lösungsraums zu erhalten, gibt es, wie in Abbildung 38 gezeigt, verschiedene Methoden. Hierdurch lassen sich die erzeugten Scanstrategien analysieren, bewerten und abschließend auswählen. Ziel muss es sein, durch die geeignete Definition von *Schranken* mit den zugehörigen Bewertungskriterien in der Kombination mit der jeweils geeigneten Methode sukzessive eine Scanstrategie als Lösung zu bestimmen. Bei jeder *Schranke* werden offensichtlich nicht geeignete Optionen entfernt und so nur eine reduzierte Anzahl für die weitere Untersuchung beibehalten. Dabei ist die Abfolge der *Schranken* vom Groben ins Feine unbedingt zu beachten. Zuerst müssen allgemeine, einfach zu bewertende Aspekte gewählt werden, um augenscheinlich nicht geeignete Optionen auszuschließen. In der Folge sind detaillierte Aspekte zu bestimmen, um auch feinere Unterschiede in den Scanstrategien analysieren zu können. Dieses Vorgehen zielt u. a. darauf ab, die mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbundenen Untersuchungen am realen Prozess zu minimieren. Beispielsweise können hierfür die folgenden Methoden und Vorgehensweisen eingesetzt werden:

- Einsatz von Experten- bzw. Erfahrungswissen und Literaturquellen
- Durchführen von Simulationsuntersuchungen
- Analyse des Temperaturfeldes
- Analyse von werkstoffbedingten Prozessabhängigkeiten während der Schichtverfestigung
- Ermittlung des Gefüges und der Oberflächenqualität des Bauteils

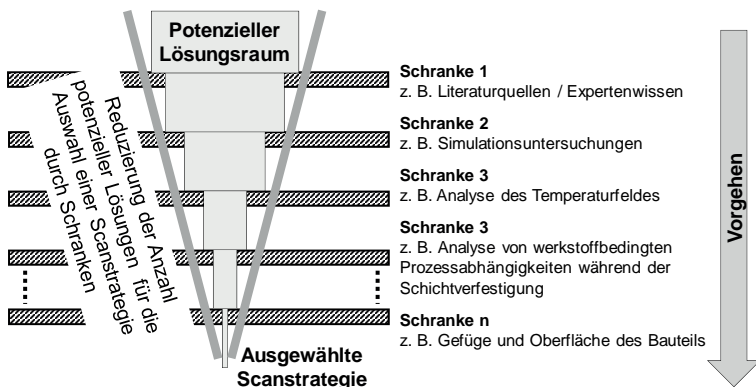
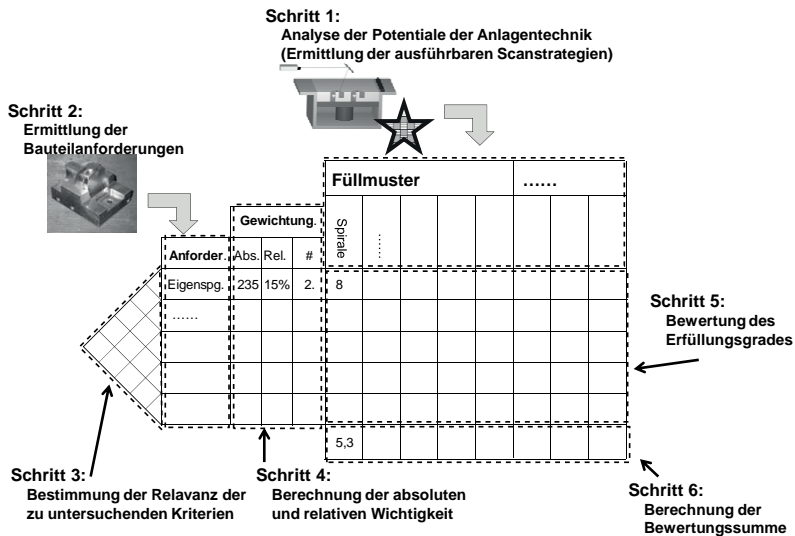


Abbildung 38: Vorgehensweisen zur Reduzierung des Lösungsraums



Da die Auswahl der Scanstrategien immer auf der Basis der in der jeweiligen Fertigungsanlage ausführbaren Scanmuster und Strahlparameter erfolgen muss, werden im ersten Schritt alle Optionen erfasst und geordnet. Dabei können die jeweiligen Elemente einer Scanstrategie entweder separat oder als bereits komplettierte Lösung betrachtet werden. Zudem reduziert sich beim Durchlaufen der Schranken sukzessive der für das jeweilige Bauteil mögliche Lösungsraum, sodass für die folgenden Bewertungen nur die noch gültigen Lösungen zu untersuchen sind.

- *Schritt 2: Ableiten der Bauteilanforderungen*
In einem zweiten Schritt sind die Bauteil- bzw. Schichtanforderungen zu definieren. Je nach zu betrachtendem Schwerpunkt müssen entsprechende Kriterien, bspw. hinsichtlich Festigkeit, Dichte des Werkstoffgefüges oder Oberflächenqualität, ausgewählt werden.
- *Schritte 3 und 4: Bestimmung der Relevanz und Ableiten der absoluten bzw. relativen Gewichtung der ausgewählten Bewertungskriterien*
Für eine systematische Bewertung der Scanstrategien sind eine Gewichtung und eine Priorisierung der jeweiligen Kriterien durchzuführen. Hierfür stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Beispielhaft kann die Rangfolgebestimmung mittels einer Matrix auf Basis des paarweisen Vergleichs als eine gut geeignete Vorgehensweise angeführt werden (LINDEMANN 2005). Mithilfe dieser Vorgehensweise lässt sich durch die sequentielle Beurteilung der Relevanz jedes Kriteriums gegenüber jedem anderen Kriterium eine Präferenzaussage treffen. Über die Summenbildung der Einzelergebnisse, d. h. über die Anzahl, wie oft ein Kriterium als das wichtigere genannt wird, sind in einer Matrix zum einen die Bestimmung des Rangs und zum anderen die Gewichtung des jeweiligen Kriteriums möglich. Somit lässt sich damit die relative Gewichtung, bezogen auf die Gesamtbewertung, berechnen. Diese Schritte 3 und 4 müssen durchgeführt werden, wenn keine klare Kriterienpriorisierung und -gewichtung bekannt sind. Bei bereits anderweitig ermittelten oder durch den Benutzer vorgegebenen Rangfolgen und Gewichtungen sind auch eine direkte Eingabe und Zuordnung zu den jeweiligen Kriterien möglich.
- *Schritt 5: Ermittlung des Erfüllungsgrades für die gewählten Kriterien*
Die in den vorhergehenden Abschnitten ermittelten und gruppierten Kriterien werden in Schritt 5 den Potenzialen und Möglichkeiten der jeweiligen Fertigungsanlage gegenübergestellt. Die Bewertung erfolgt anhand des Erfüllungsgrades der betrachteten Scanstrategieoption für das jeweilige Kri-

3.2 Entwicklung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien

terium. Sind die Anforderungen durch die Option gut erfüllbar, kann ein hoher Wert (z. B. 10) in eine Bewertungsmatrix eingetragen werden. Ist durch die Option das Kriterium nur bedingt bzw. nicht darstellbar, so sind dort entsprechend geringere Werte einzutragen.

- *Schritt 6: Berechnen der Bewertungssumme zur Auswahl der Optionen*

Für die einzelnen Aspekte werden die in Schritt 5 angegebenen Werte mit den in Schritt 3 und 4 bestimmten Faktoren gewichtet aufsummiert. Die Ergebnisse erlauben einen Vergleich verschiedener Lösungen, sodass entweder eine Lösung ausgewählt oder verschiedene Lösungen für eine weitere Untersuchung bestimmt werden können.

Die iterative Wiederholung dieser Schritte mit den jeweils gültigen Scanstrategien bei verschiedenen Schranken mit angepassten Kriterien ist so lange erforderlich, bis die optimale Scanstrategie bestimmt werden kann. Zudem kann die Gewichtung der Bewertungskriterien, wie oben beschrieben, in den Schritten 3 und 4 erfolgen oder durch den Benutzer vorgegeben werden.

Auch stellen die erläuterten allgemeinen Schritte zur Bewertung von Scanstrategien das Grundgerüst zu deren Auswahl dar. Dieses Vorgehen kann sowohl für die Auswahl einzelner Optionen als auch für die Bewertung von vollständig definierten Scanstrategien angewandt werden. Jedoch ergeben sich bei der singulären Bewertung einzelner Optionen gegenüber dem Vergleich gänzlich bestimmter Scanstrategien deutliche Unterschiede. Da sich der Einfluss je nach Option oftmals nur auf eine Auswahl der definierten Bewertungskriterien erstreckt, ist in diesen Fällen nur eine Analyse der relevanten Kriterien erforderlich. Für eine Vergleichbarkeit sind jedoch abhängig von der Gruppe (z. B. für die Gruppe *Form* mit den Elementen *Dreieck*, *Quadrat* und *Hexagon*) immer die gleichen Kriterien auszuwählen. Dieses Vorgehen wird bei einer noch großen Anzahl möglicher Lösungen eingesetzt, um durch eine Reduzierung der Zahl der Teillösungen schnell eine Verkleinerung des Gesamtlösungsraums zu erreichen. Die ganzheitliche Bewertung von Scanstrategien ist bei einer schon vorab deutlich reduzierten Lösungsanzahl zur abschließenden Detaillierung einzusetzen.

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

3.3.1 Installierte Anlagentechnik

Für den experimentellen Teil dieser Arbeit stand eine Elektronenstrahl-Universalkammeranlage vom Typ pro-beam K6 zur Verfügung. Kernbereiche der installierten Elektronenstrahlanlage K6 der Firma pro-beam AG & Co. KGaA sind die Elektronenstrahlkanone mit den zugehörigen Systemen zur Strahlerzeugung, -führung und -formung sowie die Bearbeitungskammer mit dem für das Verfahren notwendigen Pulverauftragsmechanismus, dem Hochspannungserzeuger, den Vakuumpumpen und der Anlagensteuerung. Die originäre Auslegung der Anlage hinsichtlich ihrer Strahlcharakteristik und der verbauten Anlagenkomponenten ist die einer Schweißanlage, welche für verschiedene fügetechnische Aufgaben flexibel mittels eines Koordinatentisches umgerüstet werden kann. Ebenso ist die integrierte Strahlsteuerung zu nennen, welche die für das Elektronenstrahlschweißen erforderlichen Figuren zum sogenannten Strahlpendeln ausreichend schnell erzeugt und an die elektromagnetischen Spulen überträgt. Aufgrund der vorgestellten Grundkonfiguration als Schweißanlage musste eine Modifikation verschiedener Anlagenkomponenten für die Implementierung des Elektronenstrahlschmelzens vorgenommen werden. In Abbildung 40 sind links eine Fotografie des installierten Systems und rechts der schematische Aufbau der Anlage dargestellt.

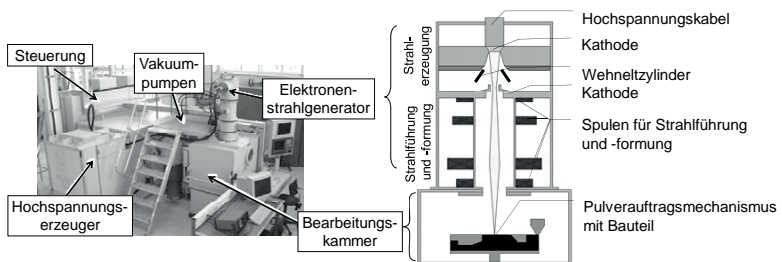


Abbildung 40: Aufbau der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

Für die weitere Bearbeitung sind in Tabelle 4 die wichtigsten technischen Daten der installierten Elektronenstrahl-Universalkammeranlage K6 aufgeführt (PRO-BEAM 2007).

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

Vakuum (Grad der Evakuierung in der Arbeitskammer):	ca. 1×10^{-4} mbar
Max. Strahlleistung	10 kW
Max. Beschleunigungsspannung	100 kV
Max. Strahlstrom	100 mA
Positionierzeit	2 ns (Punkt zu Punkt)
Ablenkssysteme	elektromagnetische Linsen
Volumen der Arbeitskammer	ca. 600 l
Abmessungen der Arbeitskammer in mm (l x b x h)	ca. 1000 x 800 x 800

Tabelle 4: Technische Daten der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

Der *Elektronenstrahlgenerator* wird, wie in Abbildung 40 gezeigt, aus dem eigentlichen Strahlerzeuger und den magnetischen Spulen zur Strahlablenkung gebildet. Der Elektronenstrahlgenerator der Universalkammeranlage besteht aus einem Triodensystem mit der Möglichkeit, Elektronenstrahlen mit einer Leistung von bis zu 10 kW bei einem minimalen Fokusbereich von ca. 0,1 mm und somit einer maximalen Leistungsdichte im Fokus von $1,2 \times 10^6$ W/mm² zu erzeugen. Der Elektronenstrahl kann für das beim Elektronenstrahlschweißen erforderliche Strahlpendeln in flexiblen Figuren frei bei Positionierzeiten von bis zu 2 ns bei Ansteuerung zweier Punkte abgelenkt werden (PRO-BEAM 2007). Hierdurch lassen sich mittels der eingebauten Spulen Ablenkgeschwindigkeiten für das Elektronenstrahlschmelzen im Bereich von mehreren 1000 m/s realisieren (ZAEH ET AL. 2007A).

Die *Bearbeitungskammer*, hier die Vakuumkammer der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage, beinhaltet alle mechanischen Komponenten und Aufbauten für das Baufeld zum selektiven Verfestigen. Dieses ist gegenüber der Umgebungsatmosphäre abgedichtet. Auch schirmt eine Bleiummantelung nach der Röntgenverordnung (RöV) das Anlagenumfeld vor der bei der Energieübertragung der Elektronen auf den Werkstoff entstehenden Röntgenstrahlung ab. Notwendige elektrische bzw. mechanische Energie sowie Steuersignale werden über Schnittstellen ausgetauscht.

An den Bauraum angeschlossen ist ein mehrstufiges System verschiedener Typen von *Vakuumpumpen* zur Evakuierung des Bauraums und der Elektronenstrahlkammer. Übliche Pumpentypen sind hierfür bspw. Drehschieber-, Wälzkolben-, Vakuumdifusions- oder Turbomolekularpumpen. Mit diesem Aufbau ist es möglich, den Bauraum in weniger als drei Minuten auf den Restdruck von ca. 10^{-4} mbar zu evakuieren.

Das eingesetzte Netzgerät HVR 103-100 als *Hochspannungserzeuger* für Elektronenstrahlquellen generiert neben der Beschleunigungsspannung auch die Wehneltspannung zur Regelung des Strahlstroms. Ebenso stellt es den Strahlstrom und den Heizstrom für die Kathode zu Verfügung. Mit diesem Gerät lässt sich die benötigte Beschleunigungsspannung zwischen 60 und 100 kV frei wählen, wobei die Startrampe zur Spannungsausbildung 10 s benötigt. Die Wehneltspannung kann bis zu einem maximalen Potenzialunterschied von 1500 V, der Strahlstrom bis zu 100 mA und der Kathodenheizstrom bis zu 40 A eingestellt werden.

Die Elektronenstrahlerzeugung und -ablenkung werden in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage von den folgenden *Steuerungssystemen* überwacht:

- CNC (*Computerized Numerical Control*)
- SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung)
- *MiniMod* (spezifische Software des Unternehmens pro-beam AG & Co. KGaA zur Elektronenstrahlsteuerung)

Die Bedienoberfläche der CNC-Steuerung ermöglicht es den Anwendern, Strahlparameter wie bspw. Strahlstrom, Beschleunigungsspannung, Fokusslage oder gewünschte Strahlfigur einfach über genormte Befehle einzugeben. Sie steuert auch die in den mechanischen Aufbauten integrierten Motoren an und verwirklicht so die Verfahrenswege. Die SPS überwacht die Anlagenperipherie wie die Vakuumpumpen oder das Kühlsystem und die Strahlerzeugung. In der spezifischen Software *MiniMod* des Unternehmens pro-beam AG & Co. KGaA sind in der Basiskonfiguration Ablenkfiguren für Schweißaufgaben hinterlegt, deren Auswahl durch entsprechende Befehle im Rahmen der Programmierung der CNC stattfindet. Zudem regelt die Software auch den Stromdurchfluss in den verschiedenen elektromagnetischen Spulen zur Erzeugung der gewünschten Strahlablenkung. Die Software bietet eine Schnittstelle, mit der benutzerspezifische Strahlfiguren und Ablenkwege eingelesen und in der Folge über Kommandos der CNC ausgewählt werden können.

3.3.2 Modifikationen an der Anlagentechnik

3.3.2.1 Allgemeines

Die für diese Arbeit erforderlichen Modifikationen der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage erfolgten anhand der in Kapitel 1 genannten Zielset-

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

zung. Es wurden insbesondere Aspekte hinsichtlich einer Qualifikation der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für die generative Fertigung sowie der Applikation verschiedener Scanstrategien untersucht. Hierfür werden nach dem Bestimmen der Anforderungen in Abschnitt 3.3.2.2 die erforderlichen Anlagen-erweiterungen in Abschnitt 3.3.2.3 abgeleitet. Als wesentliche Inhalte zur Anlagenmodifikation werden in Abschnitt 3.3.2.4 die Arbeiten zur Integration des Auftragsmechanismus und in Abschnitt 3.3.2.5 die Erweiterung der Anlagensteuerung beschrieben.

3.3.2.2 Anforderungen

Wie erläutert, ist die eingesetzte Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für Schweißverfahren ausgelegt. Sie beinhaltet u. a. einen für das Elektronenstrahlschweißen optimierten Strahlerzeuger und die zugehörige Strahlsteuerung sowie einen Koordinatentisch zum Platzieren der Werkstücke. Vor allem die Strahlsteuerung bietet nicht die ausreichende Flexibilität, um Scanstrategien für die generative Fertigung umzusetzen. Auch wurde bisher noch keine Anlage dieses Typs als System für die generative Fertigung umgerüstet. Die Intention der vorliegenden Arbeit beim Umbau der vorhandenen Anlagentechnologie ist es, die erläuterten Potenziale des Elektronenstrahls für die generative Fertigung metallischer Bauteile zu nutzen. Daraus ergeben sich für die Teilbereiche die folgenden Anforderungen.

Die für das Elektronenstrahlschmelzen spezifischen Anforderungen an den *Elektronenstrahlgenerator* können durch einen Vergleich mit den Anlagendaten des generativen laserstrahlbasierten Fertigungssystems EOSINT M 280 (EOS 2010) abgeleitet werden. Bei diesem System werden Strahlleistungen von bis zu 400 W mit einem minimalen Fokusbereich von 100 μm und einer Leistungsdichte von $5,1 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ erreicht. Als maximale Ablenkgeschwindigkeit werden 7 m/s angegeben. Für eine erfolgreiche Adaption des Fertigungsprozesses EBM auf der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage ist es daher notwendig, diese charakterisierenden Werte zu erreichen. In diesem Zusammenhang muss auch der anlageneigene *Hochspannungserzeuger* betrachtet werden. Dieser ist erforderlich, um die notwendigen elektrischen Leistungen und Spannungen (z. B. Heizstrom, Strahlstrom, Beschleunigungsspannung und Sperrspannung) und somit die Elektronenstrahlkennwerte bereitzustellen.

In die *Bearbeitungskammer* muss der Bauraum für die generative Fertigung inklusive des mechanischen Systems zum Schichtauftrag, der sogenannte Auf-

tragsmechanismus, integriert werden. Dieser ist für die Erfüllung der geforderten Funktionen zur Handhabung des metallischen Pulvers während des Elektronenstrahlenschmelzens der zentrale Bestandteil. Neben dem Aufbringen einer in Höhe und Ebenheit definierten Pulverschicht erstrecken sich weitere Aufgaben bspw. noch auf die Bereiche Pulverbevorratung und -portionierung (VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995A), thermische und mechanische Isolation des Baufeldes oder sichere Ableitung elektrischer Ladungen aus dem Bauraum (SIGL 2008). Zudem sind wirtschaftliche und weitere technologische Randbedingungen wie eine kostengünstige Fertigung oder die Eignung für den Vakuumbetrieb zu berücksichtigen. Zudem müssen, um einen automatisierten Betrieb zu gewährleisten, die Funktionen und Abläufe des Auftragsmechanismus über eine definierte Schnittstelle gesteuert werden. Dies beinhaltet einerseits die mechanischen Abläufe zum Aufbringen des Pulvers, andererseits die Kopplung mit der Anlagen- und der Strahlsteuerung. Mit den *Vakuumpumpen* ist der für Elektronenstrahlschweißaufgaben notwendige Restdruck von ca. 10^{-4} mbar zu realisieren (SCHULTZ 2000).

Als ein zusätzliches wichtiges System muss für die Modifikation die implementierte *Anlagen- und Strahlsteuerung* betrachtet werden. Diese stellt mit den zugehörigen Komponenten wie Software, Sensoren und Aktoren ein wichtiges Teilsystem für alle automatisierten Fertigungsaufgaben dar. Für die hier genutzte Elektronenstrahl-Universalkammeranlage sollte die Flexibilität geschaffen werden, verschiedene Fertigungsaufgaben, u. a. das generative Fertigen, durchzuführen. Insbesondere die in Abschnitt 3.3.1 vorgestellten Komponenten CNC, SPS und *MiniMod* sollten für eine aufwandsarme Anlagenmodifikation zielgerichtet angepasst werden. Zudem war die Anlagensicherheit in Zusammenhang mit dem Elektronenstrahl und der Vakuumtechnik zu berücksichtigen. Vor allem die verschiedenen, oftmals komplexen, über Strahlpendelfiguren hinausgehenden Ablenkwege für die jeweiligen Bauteilquerschnitte sind automatisch zu erzeugen und anschließend in die Steuerung zu übertragen. Durch die Strahlablenkung muss auch an Unstetigkeitsstellen, d. h. an Stellen mit einer nicht kontinuierlichen Richtungsänderung, eine nahezu konstante Ablenkgeschwindigkeit sichergestellt werden. Durch diese Modifikationen der Steuerung ist der prozesssichere Ablauf des Elektronenstrahlenschmelzens mit den Schritten *Pulverauftrag*, *Vorwärmen* und *selektives Verfestigen* der Bereiche zu gewährleisten.

Neben den oben beschriebenen Anforderungen für die einzelnen Teilsysteme der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage war für das Gesamtsystem noch zu berücksichtigen, dass ein modularisiertes, flexibles System aufgebaut wird. Das bedeutet, dass ein Umbau der einzelnen Teilsysteme einfach möglich sein musste

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

und dass Wechselwirkungen aufgrund der Modifikationen möglichst vermieden werden sollten.

3.3.2.3 Anlagenerweiterungen

Die in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten Teilsysteme Elektronenstrahlerzeuger, Hochspannungserzeuger, Bearbeitungskammer, Vakuumpumpen sowie Anlagen- und Strahlsteuerung stellten auch den Ausgangspunkt dar, um die Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für das Elektronenstrahlschmelzen zu modifizieren und zu erweitern. In Tabelle 5 werden bei jedem dieser Teilbereiche die im vorigen Abschnitt für die Anlagentechnik ermittelten Anforderungen den an der Elektronenstrahlkammer-Universalkammeranlage verfügbaren Funktionen gegenübergestellt. Hieraus lassen sich die Handlungsfelder für die Modifikation und Erweiterung der Elektronenstrahl-Universalkammer ableiten.

Bestehendes System (Elektronenstrahl- Universalkammeranlage)		Modifiziertes System zum Elektronenstrahl- schmelzen	
Teil- system	Funktionen und Merkmale	Anforderungen	Handlungsfelder
Strahlerzeuger inkl. Hochspannungs- erzeuger	Max. Strahlleistung 10 kW	Strahlleistung $\geq 400 \text{ W}$	Die Anforderungen konnten mit dem vor- handenen Strahl- bzw. Hochspannungs- erzeuger abgedeckt werden.
	Min. Fokusbereich 0,1 mm	Fokusbereich $\leq 0,1 \text{ mm}$	
	Max. Intensität im Fokus $1,2 \times 10^6 \text{ W/mm}^2$	Intensität im Fokus $\geq 5,1 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$	
	Ablenkgeschwindigkeit $> 1000 \text{ m/s}$	Ablenkgeschwindig- keit $\geq 7 \text{ m/s}$	
Bearbeitungskammer	Koordinatentisch für Schweißaufgaben	Pulverauftrags- mechanismus	Integration eines für Vakuumbedingungen geeigneten Pulverauf- tragsmechanismus
	Daten- und Energie- schnittstellen für xy-Koordinatentisch	Zusätzliche Schnitt- stellen für den Pulverauftrags- mechanismus	Spezifische Erweite- rung der Schnittstellen
	Abdichtung gegenüber der Umgebungs- atmosphäre	Sicherstellen eines ausreichenden Evakuierungsgrades	Die Anforderungen konnten mit der vor- handenen Anlagen- technik abgedeckt werden.
	Bleiummantelung als Röntgenschutz	Röntgenschutz wäh- rend des Betriebs	
Vakuumpumpen	Sperrschieber-, Wälzkol- ben-, Vakuumdiffusions- oder Turbomolekular- pumpen	Sicherstellen eines ausreichenden Evakuierungsgrades	Die Anforderungen konnten mit der vor- handenen Anlagen- technik abgedeckt werden.
Anlagen- und Strahlsteuerung	CNC- und SPS- Steuerung für die Ge- samtanlage, <i>MiniMod</i> - Steuerung für die Strahl- ablenkung	Flexible Ablenkung (Scannen) des Elekt- ronenstrahls zum selektiven Verfestigen des Schichtquer- schnitts	Gestaltung einer flexib- len, offenen Software, um neue und individu- elle Scanstrategien automatisch für das EBM erzeugen und umsetzen zu können

Tabelle 5: Gegenüberstellung von Anforderungen sowie verfügbarer Funktionen und Merkmale für ein System zum Elektronenstrahlschmelzen in der verwendeten Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

Aus der Übersicht wird deutlich, dass für die Teilsysteme Elektronenstrahlerzeuger, Hochspannungserzeugung und Vakuumpumpen die Anforderungen bereits erfüllt werden konnten. Eine Modifikation bzw. Erweiterung dieser Teilsysteme für das Elektronenstrahlschmelzen war aufgrund des bestehenden Anlagenaufbaus nicht notwendig. Es lässt sich so ein Elektronenstrahl, welcher die für das selektive Verfestigen erforderlichen Werte sicher erreicht bzw. übertrifft, prozesssicher erzeugen. Ebenso werden die notwendigen Umgebungsbedingungen, wie bspw. der erforderliche Grad der Evakuierung, durch die Vakuumpumpen erzielt. Der Aufbau der Teilsysteme Bearbeitungskammer sowie Anlagen- und Strahlsteuerung bedurfte einer z. T. umfangreichen Modifikation bzw. Erweiterung des bei der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage bestehenden Funktionsumfangs. In die Bearbeitungskammer musste der Auftragsmechanismus als eine Vorrichtung integriert werden, die den iterativen Schichtauftrag metallischen Pulvers durchführt. Die Anlagen- und Strahlsteuerung bedurfte ebenfalls Veränderungen, um das Elektronenstrahlschmelzen durchführen zu können. Die Arbeiten zur Anpassung der Bearbeitungskammer sowie zur Erweiterung der Anlagen- und Strahlsteuerung werden in den folgenden beiden Abschnitten erläutert.

3.3.2.4 Integration eines Auftragsmechanismus in die Bearbeitungskammer

Für die Handhabung des metallischen Pulvers zum Auftragen der jeweiligen Bauteilschicht während des Prozesses ist der in die Bearbeitungskammer integrierte Auftragsmechanismus der zentrale Bestandteil für die Erfüllung der geforderten Funktionen. Grundsätzlich werden solche Vorrichtungen bereits in verschiedenen Patenten und Veröffentlichungen (z. B. HUTFLESS 2005, SCHUTZRECHT US4863538A 1989, VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995B) beschrieben. Diese unterscheiden sich vor allem in Detaillösungen wie bspw. im Ablauf der Pulverportionierung oder im integrierten Rakel. Für den Aufbau eines Pulverauftragsmechanismus in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage wurden daher die bestehenden Ansätze analysiert und bewertet. Darauf aufbauend wurde ein an die Anlage und den Elektronenstrahlschmelzprozess angepasstes Konzept abgeleitet. Wie in Abbildung 41 zu erkennen, sind in diese Vorrichtung alle für den Prozess relevanten Bauteile wie Rakel, Pulvervorratsbehälter und Antrieb integriert.

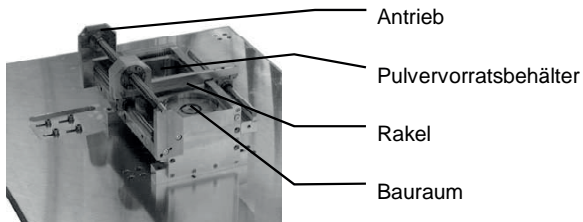


Abbildung 41: Entwickelter und in die Elektronenstrahl-Universalkammeranlage integrierter Auftragsmechanismus

Durch die Einbindung der Motoren des Auftragsmechanismus in die bestehende CNC- und SPS-Steuerung der Anlagentechnik gelang es, die Modifikationen am Aufbau der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für die hier vorliegenden Untersuchungen zu minimieren. Das Rakel bzw. die Höhenverstellung konnten als x- bzw. y-Bewegungsachse im Rahmen der in der Anlage enthaltenen Steuerung vom Typ Sinumerik 840D definiert werden. Daher sind der Einsatz genormter CNC-Befehle für die Bewegung der einzelnen Komponenten und die Synchronisation mit der Elektronenstrahlerzeugung und -ablenkung über die anlageeigene SPS ohne weitere spezifische Anpassungen möglich.

3.3.2.5 Anlagensteuerung

Die Anlagensteuerung mit den zugehörigen Komponenten wie Software, Sensoren und Aktoren stellt ein wichtiges Teilsystem für alle automatisierten Fertigungsaufgaben dar. Für die hier eingesetzte Elektronenstrahl-Universalkammeranlage wurde die Flexibilität geschaffen, verschiedene Fertigungsaufgaben, u. a. das generative Fertigen, durchzuführen. Insbesondere die vorhandene Kommunikationsstruktur der Komponenten CNC, SPS und *MiniMod* (siehe Abbildung 42) sollte für eine aufwandsarme Anlagenmodifikation zielgerichtet angepasst und erweitert werden.

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

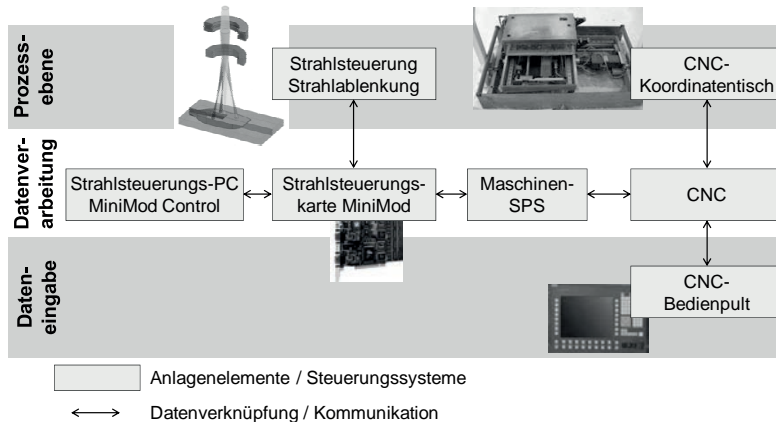


Abbildung 42: Steuerungsarchitektur der vorhandenen Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

Das Vorgehen der Modifikation der bestehenden Steuerung der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage war zu wählen, da verschiedene implementierte Grundfunktionen auch für das Elektronenstrahlschmelzen geeignet sind und adaptiert werden sollten. Zudem war die Anlagensicherheit zu wahren.

Die oftmals komplexen Ablenkwegen einer punktförmigen Energiequelle zum selektiven Verfestigen einer Pulverschicht für die verschiedenen Bauteilquerschnitte sind automatisch zu erzeugen und anschließend in die Steuerung zu übertragen. Durch die Strahlablenkung muss auch an Unstetigkeitsstellen, d. h. an Stellen mit einer nicht kontinuierlichen Richtungsänderung, eine nahezu konstante Ablenkgeschwindigkeit sichergestellt werden. Das Eingabeformat muss in der Lage sein, sowohl die Anforderungen hinsichtlich der flexiblen Erzeugung verschiedener Ablenkwegen zu erfüllen als auch die genaue Ablenkung bei hohen Ablenkgeschwindigkeiten während einer Schichtverfestigung zu gewährleisten. Die Anlagensteuerung muss zudem die mechanischen Komponenten zum Pulverauftrag inklusive der zugehörigen Sensoren und Aktoren ansprechen. Das beinhaltet die durch elektrische Motoren erzeugten Bewegungen und das Synchronisieren der Abläufe mit der Elektronenstrahlablenkung.

Die *Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)* besteht aus einer elektronischen Baugruppe, die Funktionen zur Steuerung bzw. Regelung einer Maschine oder Anlage besitzt. Geber (Sensoren) und Stellglieder (Aktoren) sind mit dieser Baugruppe verbunden. Das zugehörige Betriebssystem stellt sicher, dass dem Pro-

gramm immer der aktuelle Zustand der Geber zur Verfügung steht. Mithilfe dieser Informationen kann das Programm die Aktoren so beeinflussen, dass in der jeweiligen Anlage die gewünschten Funktionen ablaufen. Bei der Anpassung der Anlagensteuerung ist die SPS insofern von Relevanz, als diese einerseits die Peripherieprozesse, bspw. die Vakuum- und Hochspannungserzeugung, steuert und andererseits auch sicherheitskritische Aufgaben erfüllt. Hierfür überwacht sie u. a. den Kühlwasserfluss des Systems oder den Öffnungszustand der Türen. Vor allem schaltet die SPS den Elektronenstrahl mit den zugehörigen Parametern ein. Ebenso findet ein Abgleich mit den von der *MiniMod* übermittelten und den im Hochspannungserzeuger erfassten Daten statt. Der Anwender hat nur sehr begrenzt die Möglichkeit, aktiv in die Gestaltung des Programmablaufs der SPS einzugreifen. Aufgrund der geforderten Anlagensicherheit müssen Modifikationen an der Programmstruktur vom Anlagenhersteller ausgeführt werden.

Mithilfe der *Computerized Numerical Control (CNC)* lassen sich allgemein in Werkzeugmaschinen und Anlagensteuerungen verschiedene Achsen einfach und wiederholgenau zum Anfahren von Punkten oder zum Abfahren von Bahnen ansteuern. Die Vorgabe erfolgt durch Programme nach DIN 66025 (1987). Innerhalb der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage wurde dieser Ansatz genutzt, um den Pulverauftragsmechanismus einzubinden und verschiedene, als CNC-Achsen definierte Strahlparameter anzusprechen. Insbesondere sind hier die elektromagnetischen Spulen zur Fokussierung, der Strahlstrom, die Beschleunigungsspannung und die Möglichkeit zur Strahlablenkung in x- bzw. y-Achse zu nennen. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Taktzeit der CNC mehrere ms beträgt. Bei Ablenkgeschwindigkeiten von 1 m/s bedeutet dies, dass der Fokuspunkt innerhalb 1 ms um ca. 1 mm abgelenkt wird. Dies ist somit die minimale Länge einer CNC-programmierten Scanlinie, was für ein exaktes Scannen einer Querschnittsfläche nicht ausreicht. Jedoch werden für die Anlagenqualifikation zur generativen Fertigung die Funktionalitäten der CNC benötigt, da diese eine offene Programmieroberfläche mit einer genormten Sprache zur Definition der gewünschten Aktionen bietet. Von den Anwendern können somit Vorgänge für die generative Fertigung individuell gestaltet werden. Im Weiteren war es für die aufwandsarme Umgestaltung wichtig, dass bereits Schnittstellen zur Integration von Servomotoren bestanden, sodass auch die Steuerung des jeweiligen elektromechanischen Antriebs von Rakel und Bauplattform über das System realisierbar war. Zudem können Aktionen zur Strahlsteuerung mittels der *MiniMod* über definierte Befehle und Schnittstellen ausgelöst werden. Hierbei ist vor allem die Möglichkeit der Nutzung spezialisierter Schweißfiguren zu nennen. Im jeweiligen Programm werden die für die Strahlfi-

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

gur notwendigen Parameter wie bspw. Figurnummer und Figurgröße definiert und an die *MiniMod*-Control-Software übertragen. Aufgrund dieser Freiheiten ist die CNC mit ihrer Bedienoberfläche ein integraler Bestandteil der umzugestaltenden Anlage.

Mittels der sogenannten *MiniMod* wird u. a. die Strahlposition (x, y) berechnet und ausgegeben. Je nach zeitlicher Anforderung kann entweder eine schnelle Steuerung, z. B. für die Strahlposition, oder eine Analogausgabe für die Einstellung der Strahlstigmatisierung (Sicherstellen einer rotationssymmetrischen Energieverteilung) und Strahljustierung (Einstellen einer möglichst zentrischen Energieverteilung im Strahlengang) durchgeführt werden. Hauptbestandteil der zugehörigen *Controller*-Karte ist ein schneller FPGA (*Field Programmable Gate Array*), ein flexibel modifizierbarer Logikbaustein. Mittels integrierter 16-bit-Multiplizierer erfolgt die komplette Kurvenberechnung für die Strahlablenkung, bestehend aus Amplituden-, Vektor- und Offset-Erzeugung auf digitaler Ebene. Durch Parallelverarbeitung erreicht das System hohe Leistungen, d. h. mit einer Frequenz von 50 MHz (Taktzeit 2 ns) bildet die *MiniMod* neue x- und y- Sollwerte. Diese dienen als Eingangsinformationen für den nachfolgenden Magnetstromverstärker zur Erzeugung der benötigten Spulenströme. Die Kommunikation mit der SPS erfolgt über ein Profibus-Interface, wobei einige Kommandos über eine serielle Schnittstelle zu einem PC durchgeschleift werden. Die *MiniMod* kann einerseits von der CNC kommende analoge Offset-Signale interpretieren und andererseits die Werteeinstellung (z. B. Figurauswahl, Sprungfrequenz) mittels Parameterübergabe empfangen (PRO-BEAM 2007). Mit der Steuerungssoftware lassen sich somit für die jeweilige Bearbeitungsaufgabe optimierte Strahlablenkfiguren einsetzen. Beispielsweise ist es möglich, für Schweißaufgaben aufbereitete Strahlpendelfiguren einzulesen, wodurch eine für die Schweißnaht angepasste Energieverteilung erreichbar ist. Die Eingabeinformationen können als Punktelisten, Vektordateien und Graustufenbilder (1 bis 8 bit) vorliegen. Punktelisten sind auf 1000 xy-Koordinatenpaare innerhalb des Wertebereichs der Strahlablenkung beschränkt. Vektorfiguren geben die Anfangs- und Endpunkte eines linearen Ablenkweges sowie die dazwischen liegende Punktzahl an, sodass durch deren Aneinanderreihung eine komplexe Figur erzielt werden kann. Bei diesen beiden Möglichkeiten wird als Zeiteinheit die Verzögerung des Strahls an einem Punkt angegeben. Durch entsprechende Punktabstände und Punktverzögerungen lassen sich die Ablenkfiguren so parametrieren, dass eine für den Prozess quasi kontinuierliche Bewegung erreicht wird. Dieser Aspekt unterscheidet sich gegenüber der Ablenkung mittels Graustufenbildern. Die Bilder werden immer zeilenweise abgefahren und die Punktverzögerung für das

jeweilige Pixel ergibt sich aus dessen Helligkeitswert, multipliziert mit einem Grundwert.

Die Funktionserweiterung der Anlagen- und Strahlsteuerung erstreckt sich über mehrere Bereiche. Sie beinhaltet die Konzeption und Integration eines Softwaretools zur Schichtdatenerzeugung und die Einbindung des Pulverauftragsmechanismus. Hierdurch sollte das Ziel eines automatisierten Prozessablaufs, ausgehend von der Schichtdatenerzeugung über das Einlesen der Daten in die Strahlsteuerung bis zur Ansteuerung der Aktoren, der Motoren und des Elektronenstrahls, gewährleistet werden. Es waren, wie in Abbildung 43 gezeigt, die Ebenen der Dateneingabe mit der Prozessebene zu verbinden. Für die jeweiligen Querschnitte müssen die zugehörigen Schichtdaten berechnet und in die Strahlsteuerungskarte *MiniMod* übertragen werden. Hierfür werden in einem eigenständigen Softwaretool, der Schichtdatenerzeugung, die jeweiligen Querschnitte mit Scanmustern ausgefüllt und so die Verfahrensweg des Elektronenstrahls erzeugt. Geeignete Schnittstellen sichern das automatisierte Übertragen dieser Informationen in die Anlagensteuerung. Aufgrund der umfangreichen Beschreibung wird dieses Softwaretool in Abschnitt 3.4 im Zusammenhang mit einer flexiblen Mustererzeugung separat erläutert.

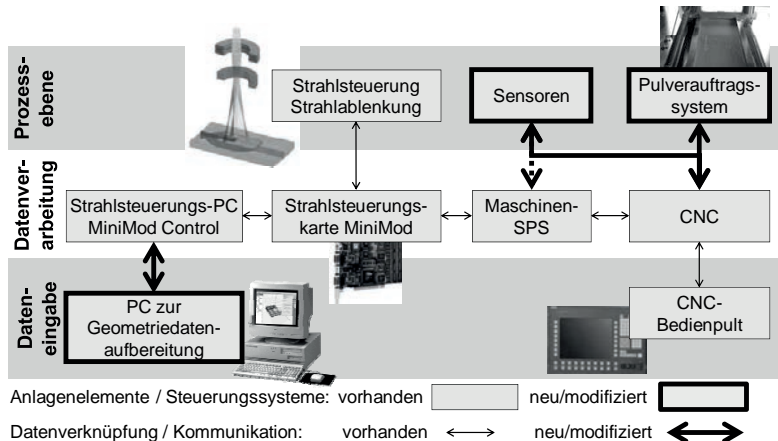


Abbildung 43: Steuerungsarchitektur der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage nach Durchführung der beschriebenen Modifikationen

Die in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage vorhandenen Steuerungssysteme boten somit eine Ausgangsbasis für den Aufbau einer Prozesssteuerung für

3.3 Verwendete Elektronenstrahl-Universalkammeranlage und deren Modifikation

das Elektronenstrahlschmelzen. Bei der Definition der Architektur war zu beachten, dass die CNC-Steuerung als eine zentrale Einheit die Teilfunktionen und Abläufe der weiteren Steuerungen (SPS bzw. *MiniMod*) bestimmt. Die CNC-Steuerung bietet eine Plattform, mit der die Bewegungen des Rakels sowie der Bauplattform als eigene NC-Achsen vom Benutzer in anwenderspezifischen Programmen festgelegt werden können. Auch lassen sich insbesondere die mit dem Softwaretool erzeugten Scanmuster mittels CNC-Routinen in der Strahlsteuerung für die Schichtverfestigung initialisieren. Es ist möglich, in der Anlage integrierte Sensoren zur Temperaturerfassung, Pulverfüllstandsmessung oder Positionserfassung direkt über Eingangsmodule der CNC oder indirekt über SPS-Signale abzurufen. Die so erzeugten Signale dienen zum zustandsabhängigen Auslösen vorab definierter Abläufe. Insgesamt können durch die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Anpassungen sowie Erweiterungen der Steuerung und über die offene Programmieroberfläche der CNC-Steuerung alle prozessrelevanten Funktionen und Parametereinstellungen beeinflusst werden.

Hinsichtlich der Definition von Figuren, welche die Strahlableitwege beschreiben, bieten vor allem die in der *MiniMod* hinterlegten Vektorfiguren das Potenzial, sowohl umfangreiche und komplexe Muster abzubilden als auch den Elektronenstrahl optimierte Pfade abfahren zu lassen. Die Punktelisten sind aufgrund der Dateigrößenbeschränkung nicht geeignet und bei den Graustufenbildern können keine komplexen Verfahrensweg eingestellt werden. Durch die vorgestellten Modifikationen waren für den Ablauf beim Elektronenstrahlschmelzen die Scanmustererzeugung im Vektorformat in einem separaten Softwaretool, die Datenübertragung in die firmenspezifische Strahlsteuerung *MiniMod* und die Ansteuerung mittels CNC-Kommandos durchführbar.

3.3.3 Resultierender modularer Aufbau

Die Modifikationen bzw. Erweiterungen in den Teilsystemen Elektronenstrahlerzeuger, Hochspannungserzeuger, Bearbeitungskammer, Vakuumpumpen sowie Anlagen- und Strahlsteuerung bildeten die Basis für ein offenes und modulares System, das für das Elektronenstrahlschmelzen genutzt werden kann. Wichtig war hier die entsprechende Gestaltung der mechanischen und datentechnischen Schnittstellen, um eine schnelle Umrüstung für verschiedene Fertigungsaufgaben zu ermöglichen. In Abbildung 44 sind die wichtigsten umgestalteten bzw. ergänzten Module für die Modifikation der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage zum generativen Fertigen dargestellt. Das im Rahmen der Ergänzung des Teilsystems Anlagen- und Strahlsteuerung geschaffene zusätzliche Modul zur

Schichtdatenerzeugung und -übertragung erlaubt die flexible Berechnung von Scanmustern und deren Bereitstellung für die Strahlsteuerung. Im Rahmen der Modifikation des Teilsystems Bearbeitungskammer wurde der üblicherweise integrierte xy-Koordinatentisch durch einen an die Kammer angepassten Auftragsmechanismus ausgetauscht. Somit kann eine einfache mechanische Umrüstung für das Elektronenstrahlschmelzen aufwandsarm erfolgen. So steht die Elektronenstrahl-Universalkammeranlage aufgrund der Modularität grundsätzlich für andere Fertigungsverfahren weiter zu Verfügung.

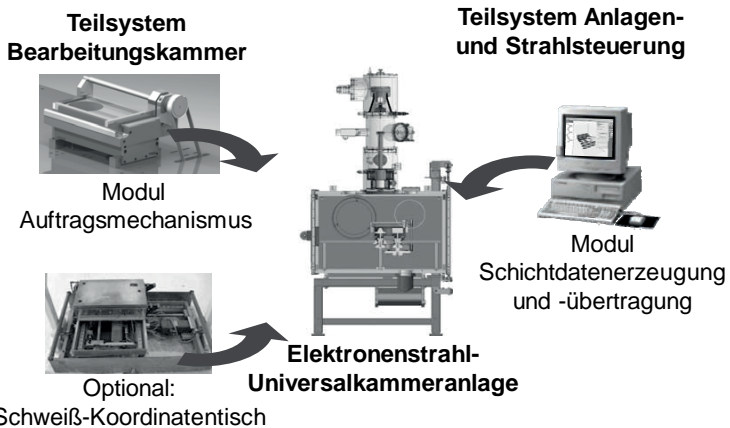


Abbildung 44: Module der verwendeten Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

3.4 Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien

3.4.1 Allgemeines

Mit dem zu entwickelnden Softwaretool soll die in Abschnitt 3.2 definierte Vorgehensweise in einer automatisierten Scanmustererzeugung umgesetzt werden. Inhalt dieses Tools ist es, ausgehend von einer Schichtgeometrie Scanmuster für die einfache Implementierung in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage zu erzeugen. Dabei sind insbesondere neue, mit der Elektronenstrahlsteuerung und -ablenkung abbildbare Funktionen und Inhalte zu integrieren.

Die Beschreibung der Umsetzung eines Vorgehens zur automatisierten Erzeugung von Scanstrategien beginnt in Abschnitt 3.4.2 mit dem Erfassen von Rand-

3.4 Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien

bedingungen und den Anforderungen an das Softwaretool hinsichtlich der Einbindung in die bestehende Umgebung oder notwendiger Schnittstellen. In Abschnitt 3.4.3 wird die Implementierung beschrieben. Die Abschnitte 3.4.4 bzw. 3.4.5 beinhalten die Einbindung des Softwaretools in den Fertigungsablauf für das Elektronenstrahlschmelzen.

3.4.2 Anforderungen und Randbedingungen

Im Rahmen eines Workshops mit Vertretern des Anlagenherstellers wurden gemeinsam die zu erfüllenden Funktionalitäten des Softwaretools herausgearbeitet. Dabei wurde deutlich, dass für dieses Softwaretool verschiedenartige Anforderungen und Randbedingungen beachtet werden müssen:

- Einbindung in die bestehende Softwareumgebung
- Format der Eingabedaten
- Datenformat des Scanmusters für die Übergabe an die MiniMod
- Struktur und Aufbau der Softwarefunktionalitäten
- Erweiterbarkeit um neue Verknüpfungen und Abhängigkeiten
- Schnittstellen zur Integration neuer Funktionen
- Benutzeroberfläche (einfache Bedienbarkeit)

Die Einbindung in die bestehende Softwareumgebung ist relevant, um bestehende Routinen, Softwarepakete und Steuerungen der Elektronenstrahl-Universal-kammeranlage weiterhin nutzen zu können. Dies betrifft zuerst die Erzeugung und Vorbereitung von Bauteildaten wie bspw. die Überführung von 3D-CAD-Daten in ein neutrales und offenes Übergabeformat als Eingangsinformation mittels CAD-Systemen. Das Datenformat des erzeugten Scanmusters soll so strukturiert sein, dass diese in die Elektronenstrahlsteuerung (*MiniMod*, siehe Abschnitt 3.3.1) eingelesen und durch Funktionen in der CNC-Steuerung definiert angesprochen werden können.

Die Eingangsdaten liegen üblicherweise im CLI-Format (*Common Layer Interface*), einer Beschreibung der Außenlinien des Schichtquerschnitts, vor. Als ein herstellerunabhängiges, neutrales Datenformat ermöglicht dies, Bauteilinformationen für die Erzeugung von Schichtdaten und -geometrien zu nutzen. Die Überführung von 3D-CAD-Dateien in Schichtdaten bzw. CLI-Dateien wird durch den Anwender zur Aufwandsreduktion mit kommerziell erhältlichen Softwaresystemen durchgeführt. Verschiedene Systeme wie z. B. Viscam, Magics oder Rapix-3D können CLI-Dateien erzeugen und abspeichern (ZÄH ET AL. 2006). Die Da-

tenausgabe eines Scanmusters des Softwaretools zur Übertragung an die *Mini-Mod* soll in deren Vektorformat erfolgen. Die Vektordatei beschreibt die Ablenkwege durch Angabe des Startpunktes, des gerichteten Abstands und der Anzahl der Punkte bis zum Endpunkt. Neben der Ablenkgeschwindigkeit bestimmen Eingaben in der CNC-Oberfläche die Größe der Figur, die Positionierung im Baufeld sowie die Leistungsparameter des Elektronenstrahls. Dieses Vorgehen bindet somit eine mit dem Softwaretool erzeugte Figur in die weitere Prozesskette ein.

Die Struktur der Software und deren Funktionalitäten müssen die Umsetzung der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Beschreibungsmethode ermöglichen. Hierzu ist eine einfache Datenstruktur, welche die dort vorgestellten Relationen abbilden kann, erforderlich. Eine Erweiterbarkeit um neue Verknüpfungen bzw. Abhängigkeiten muss ebenfalls in dem Softwaretool sichergestellt sein. Allgemein muss das Softwaretool offene Schnittstellen besitzen, um weitere Funktionen integrieren zu können. Eine grafische Bedienoberfläche (engl. *Graphical User Interface*; GUI) ist für den Einsatz des Softwaretools notwendig. Das Einlesen der Eingangsdaten, die erforderlichen Angaben zur Definition der Scanstrategie wie auch die Ausgabe der Datei für die Anlagensteuerung ist mithilfe dieser GUI durchzuführen.

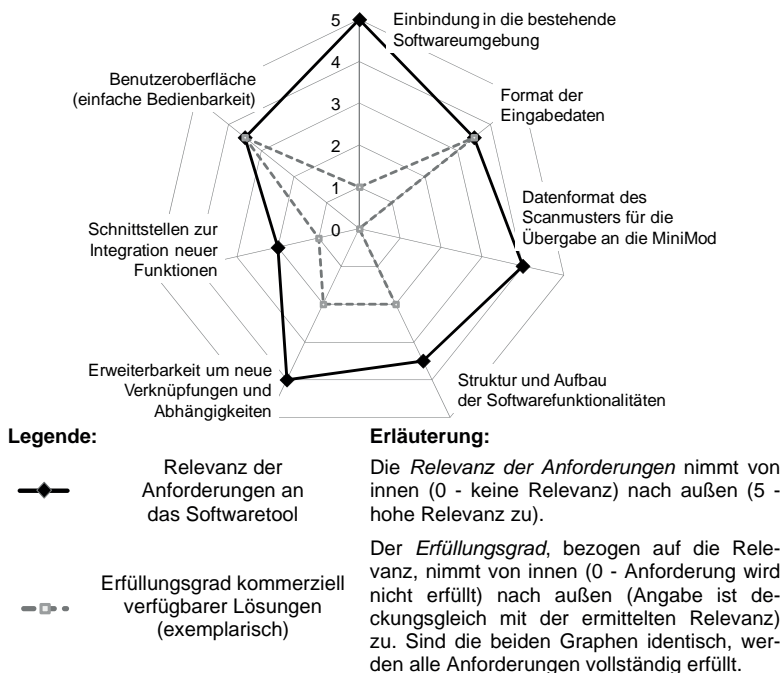
In dem gemeinsamen Workshop fand zudem eine Einordnung der jeweiligen Relevanz für die jeweilige Anforderung hinsichtlich der Gestaltung des Softwaretools statt. Wie in Abbildung 45 zu sehen, waren aufgrund der Modifikation der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage vor allem Aspekte, welche sich auf die Modifikation eines auf Schweißaufgaben spezialisierten Systems hin zu einer für das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) geeigneten Anlage beziehen, wichtig. Hierbei sind speziell die Einbindung in die bestehende (Schweißanlagen-)Steuerungsarchitektur bzw. Softwareumgebung und das Datenformat des Scanmusters zur Übergabe der Stahlablenkwege als Anforderungen mit hoher Relevanz zu nennen. Weiterhin sind für die flexible Umsetzung neuer Scanstrategien die Erweiterbarkeit um neue Verknüpfungen und Abhängigkeiten sowie die grundlegende Struktur und der Aufbau der Softwarefunktionalitäten zu berücksichtigen.

Im Weiteren wurden diese Anforderungen exemplarisch kommerziell verfügbaren Lösungen gegenübergestellt. Der in der Abbildung 45 grau dargestellte Graph zeigt, bezogen auf die Anforderungen, den jeweiligen ermittelten Erfüllungsgrad an. Sobald die Bewertung der beiden Graphen für eine Anforderung deckungsgleich ist, ist diese vollständig erfüllt. Bei einem Vergleich der beiden

3.4 Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien

Graphen ist erkennbar, dass bei bestehenden Lösungen insbesondere die Einbindung in die bestehende Softwareumgebung bzw. die Anpassung des Datenformats für die Übergabe des Scanmusters nur unzureichend erfüllt werden kann. Weitere Defizite existierender Lösungen, welche durch das zu entwickelnde Softwaretool überwunden werden sollen, sind die Erweiterbarkeit um neue Funktionen und Verknüpfungen, die für das EBM zu optimierende Struktur, der Aufbau der Softwarefunktionalitäten sowie die fehlenden Schnittstellen zur Integration neuer Funktionen.

Zusammengefasst ergab sich aus dem vorgestellten Vergleich die Notwendigkeit, die Anforderungen in einem spezifischen für das EBM an der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage zugeschnittenen Softwaretool umzusetzen. Die hierzu durchgeführten Arbeiten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.



Aufgetragen ist jeweils der im gemeinsamen Workshop ermittelte Wert.

Abbildung 45: Netzdiagramm mit der Gegenüberstellung der ermittelten Relevanz mit dem gewichteten Erfüllungsgrad der jeweiligen Anforderung an das Softwaretool in Bezug auf das Elektronenstrahlschmelzen

3.4.3 Softwaretool

3.4.3.1 Allgemeines

Für die softwareunterstützte Erzeugung von Scanstrategien war es erforderlich, die Funktionalitäten in einem automatisierten Tool mit den in Abschnitt 3.4.2 definierten Randbedingungen umzusetzen. Hierfür werden zunächst die Struktur und der Aufbau des Softwaretools (Abschnitt 3.4.3.2) sowie die grafischen Benutzeroberfläche (Abschnitt 3.4.3.3) erläutert. Abschließend wird in Abschnitt 3.4.3.4 die Ausgabedatei detailliert, die im Format der *MiniMod*-Steuerung vorliegt und die übertragenen Schichtinformationen enthält.

3.4.3.2 Struktur und Aufbau des Softwaretools

Der funktionale Aufbau des Softwaretools zur Ableitung von Vektordaten für die Strahlsteuerung orientiert sich an der in Abschnitt 3.2 entwickelten Struktur zur Beschreibung einer Scanstrategie. Im Weiteren müssen in der Programmstruktur noch Aspekte der Datenverknüpfung, der Datenausgabe oder der Visualisierung berücksichtigt werden. Hierzu wird die Vorgehensweise zur Definition von Scanstrategien in ein Funktionsdiagramm zur Beschreibung des Softwaretools überführt. Für eine Abbildung des gesamten Softwaretools ist es notwendig, Bereiche von allgemeinen Funktionen der Bildschirmdarstellung und der Berechnungsalgorithmen sowie Bereiche der Elektronenstrahlparametrierung zu ergänzen. In Abbildung 46 wird die zugehörige Programmstruktur gezeigt. Diese Darstellungsform ist an ein strukturiertes Diagramm gemäß der Methode der Objektorientierung angelehnt. Hier ist zwischen den Bereichen zur Scanmustererzeugung, zur Berechnung von Vektoren für die Datenausgabe und der Angabe von Strahleigenschaften (Elektronenstrahlparameter) für die CNC-Steuerung zu unterscheiden. Die schematische Einbindung der Angabe von Strahleigenschaften wie z. B. der Strahlleistung, der Ablenkgeschwindigkeit oder der Fokusslage erfolgt hier, um eine ganzheitliche Sicht zu ermöglichen und diese Daten systematisch für die Elektronenstrahl-Universalkammeranlage erfassen zu können. Als Funktionen bzw. Objekte werden für das Softwaretool definiert:

- *Applikation*: Diese übergeordnete Funktion bündelt alle für die Scanmustererzeugung benötigten Funktionen. Sie stellt auch die Schnittstelle z. B. für die Bildschirmausgabe und den Datenexport dar.
- *Koordinatensystem*: Hiermit wird das eingebettete Koordinatensystem definiert.

3.4 Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien

- *Scanmuster*: Diese Funktion fasst die Daten aus den untergeordneten Funktionen *Kontur*, *Form der Teilbereiche* und *allgemeine Funktionen* zu einem Scanmuster zusammen.
- *Kontur*: Hier erfolgt die Angabe der geometrischen Umrisslinien des zu erstellenden Schichtquerschnitts.
- *Form der Teilbereiche*: Diese Funktion gibt die Unterteilungsform der Teilbereiche an.
- *Füllmuster*: Das in die jeweiligen Teilbereiche eingeprägte Muster wird definiert.
- *Allgemeine Funktionen*: Diese Funktionen überprüfen vor allem die Lage des Scanlinienpunktes innerhalb oder außerhalb der Kontur bzw. der jeweiligen Form des Teilbereichs.
- *Elektronenstrahlparameter (informativ aufgeführt)*: Mittels dieser in der CNC-Steuerung hinterlegten Funktion werden die Parameter des Elektronenstrahls eingestellt, sodass das Scanmuster in eine Scanstrategie überführt werden kann.

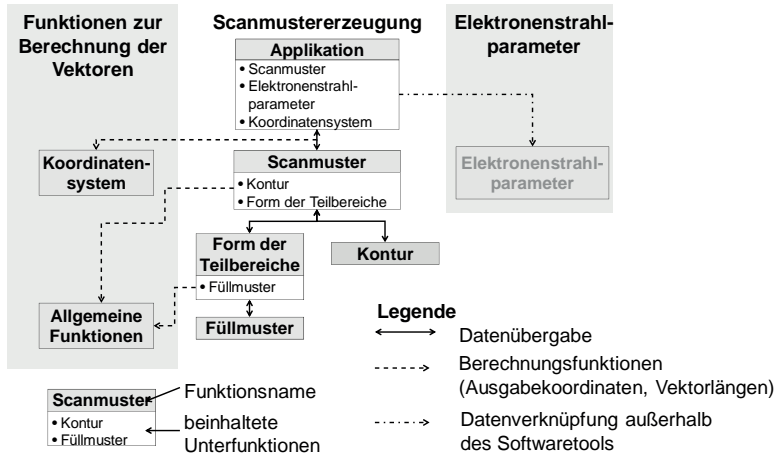


Abbildung 46: Funktionsstruktur des Softwaretools

Vor allem der Bereich der Scanmustererzeugung mit den Funktionen *Kontur*, *Form der Teilbereiche*, *Füllmuster* und *allgemeine Funktionen* beinhaltet die Umsetzung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Vorgehensweise. Durch die dort gezeigte Verknüpfung ist sowohl eine einfache Erweiterbarkeit um neue Funktionen als auch die Speicherung neuer Formen für Teilbereiche oder Füllmuster

möglich. Dieser Zusammenhang der für die Scanstrategie notwendigen Daten wird durch Abbildung 47 nochmals verdeutlicht. Hierbei werden exemplarisch die Parametereingabe und die Parameterübergabe in die jeweiligen Funktionen bzw. Objekte für die Erzeugung des *Hatchmusters* beschrieben. Die kumulierte Angabe aller Parameter in der Funktion *Applikation* wird anhand der Struktur auf die einzelnen Teilfunktionen heruntergebrochen. Durch die im Rahmen der Arbeit definierte objektorientierte Gestaltung sowohl der Methodik als auch des Softwaretools gelang es so, einen strukturierten Datenfluss über alle Ebenen sicherzustellen.

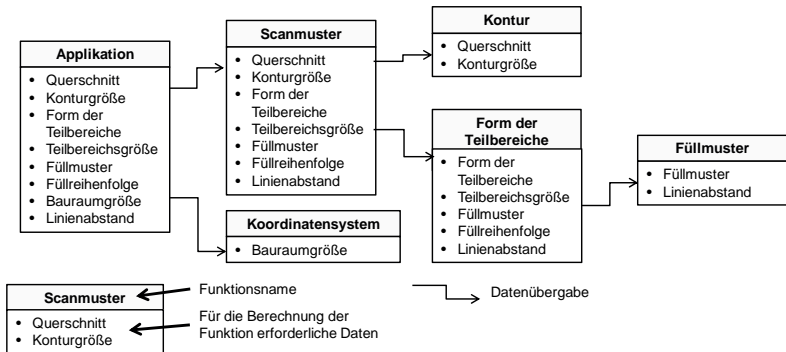


Abbildung 47: Struktur der Dateneingabe und -übergabe innerhalb des Softwaretools

Die hier dargestellte Struktur wurde in der Programmiersprache Python umgesetzt. Diese ist eine Multiparadigmensprache, d. h., verschiedene Programmieransätze wie bspw. die Objektorientierung werden unterstützt. Dies ermöglichte das Realisieren der oben genannten Funktionen mit der darin implizit enthaltenen Beschreibungsmethode der Scanstrategien. Auch wird deren einfache Erweiterbarkeit um neue Objekte mit Funktionen und Attributen wie auch einzelner Parameterausprägungen sichergestellt.

3.4.3.3 Benutzeroberfläche

Die grafische Bedienoberfläche stellt die Mensch-Maschine-Schnittstelle zwischen dem Bediener und dem Softwaretool dar. Neben den grundlegenden Einstellungen und Funktionen zur Scanmustererzeugung, wie der Eingabe von Bauteilschichten und der zugehörigen Parameter, muss eine einfache Bedienbarkeit

3.4 Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien

möglich sein. Hierzu ist die grafische Benutzeroberfläche in die folgenden Bereiche und Funktionen (siehe Abbildung 48) aufgeteilt:

- (a) *Datenschnittstelle*: Definition des Konturtyps, Auswahl der Konturdatei und Datenexport für die Strahlsteuerung;
- (b) *Scanmusterdefinition*: Eingabe der Scanmusterparameter wie Füllmuster, Form und Größe der Teilbereiche oder *Hatchlinienabstand*;
- (c) *Figuroptionen*: Skalierung und Platzierung der Figur im Bauraum, Schichtauswahl der CLI-Datei, Einstellen der Bauraumgröße;
- (d) *Anzeigeoptionen*: Darstellung der Kontur, des Füllmusters und der Teilbereiche;
- (e) *Informationsanzeige*: Berechnung und Überprüfung von Strahlparametern zur Definition der Ablenkgeschwindigkeit (Eingabe erfolgt über CNC-Bedienoberfläche);
- (f) *Visualisierung einer Schicht*.

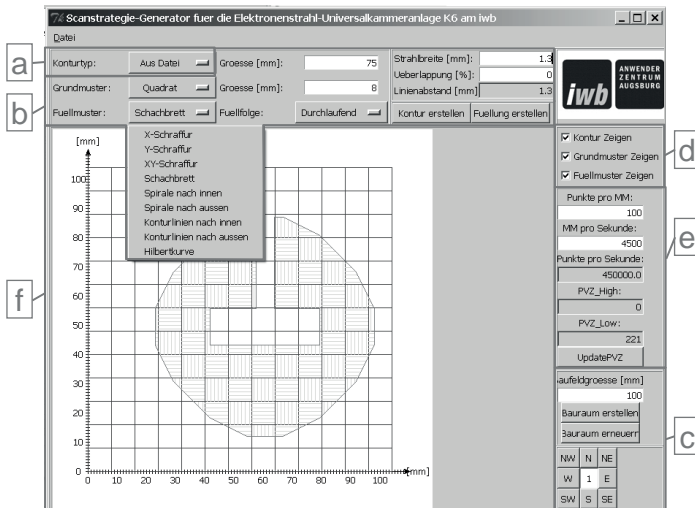


Abbildung 48: Bedienoberfläche des erstellten Softwaretools zur Erzeugung von Scanstrategien

Die Integration der aufgeführten Auswahloptionen zur Definition einer Scanstrategie in den verschiedenen Unterpunkten bzw. Menüs erlaubt die Erstellung

vielfältiger Scanstrategien und deren anschließenden Export als ASCII-Datei in die Strahlsteuerung. Durch die im aktuellen Softwarestand hinterlegten vier verschiedenen Formen der Teilbereiche, neun Füllmuster und sechs Füllreihenfolgen können 216 verschiedene Scanmuster erzeugt werden. Die zusätzliche Variation des *Hatch*linienabstands, der Größe des Teilbereichs und der Strahlparameter vervielfältigt diese Anzahl nochmals deutlich. Wie erläutert, ist es aufwandsarm möglich, aufgrund von neuen Erkenntnissen Parameterausprägungen, wie neue Formen der Teilbereiche oder Füllmuster, zu integrieren, sodass sich der Lösungsraum deutlich erweitern kann.

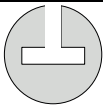














Ausprägung			Anzahl der Teillösungen
Formen der Teilbereiche	 Kompletter Querschnitt	 Hexagon  Dreieck	4
	X		X
Füllmuster	 x-Hatch	 y-Hatch	9
	 xy-Hatch	 Schachbrett	
Füllreihenfolge	 Spirale (innen → außen)	 Spirale (außen → innen)	6
	 äquidist. Konturlinien (innen → außen)	 äquidist. Konturlinien (außen → innen)	
X			X
Füllreihenfolge	 zeilenweise	 Schleifen	6
	 größter Abstand (vom Punkt X)	 stochastisch	
X			X
Gesamtanzahl der Variationen			216

Abbildung 49: Im erstellten Softwaretool hinterlegte Optionen zur Definition von Scanstrategien

3.4 Automatisierte Erzeugung von Scanstrategien

Zudem erlauben die Auswahlmenüs dem Benutzer, die gewünschten Optionen inklusive der jeweiligen Schichtkontur schnell zu bestimmen und dadurch eine Steuerdatei mit den Verfahrenswegen des Elektronenstrahls als Scanmuster für die Strahlsteuerung zu erzeugen.

3.4.3.4 Aufbau der Datei für die Strahlablenkung

Vorgaben der Elektronenstrahlsteuerung *MiniMod* bestimmen das Format und den Aufbau der Ausgabedatei für die Strahlablenkung. Für die Übertragung komplexer Strahlablenkwege hat sich aufgrund der großen Datenmenge und der Möglichkeit, auch komplexe Ablenkwege aufwandsarm darzustellen, der Einsatz von Vektordateien als die für den Prozessablauf des Elektronenstrahlschmelzens praktikabelste Lösung erwiesen. Eine Übersicht der Inhalte und des Aufbaus einer Vektordatei in der *MiniMod*-spezifischen Programmiersprache ist in Tabelle 6 dargestellt (PRO-BEAM 2007):

Bereich	Befehlszeile	Beschreibung
Datei-header	#Vector	Kennzeichen einer Vektorfigur
	#Figure 'Name'	Dateiname in der Strahlsteuerung
Figurdaten	Data	Beginn der Figurdaten
	ABS 0,8 0,4	Setzen einer absoluten Position (hier: $x = 0,8$; $y = 0,4$ bezogen auf die Baufeldgröße)
	REL 0,2 0,3 50	Interpolierte Relativposition unter Angabe der Zwischenpunkte (hier: $x = 0,2$; $y = 0,3$ bezogen auf die Baufeldgröße; Punktzahl = 50)
	UPR ... RET	Beginn und Ende eines Unterprogramms
	CALL 1 5	5-maliger Aufruf des Unterprogramms 1
	END	Ende der Figurdaten
Dateiende	EOF	End of File – Programmende

Tabelle 6: Übersicht des Aufbaus und der Befehle einer Vektordatei in der *MiniMod*-spezifischen Programmiersprache

Für die Erzeugung von Scanmustern beschränken sich die Anweisungen nahezu ausschließlich auf die Angabe von Absolut- (ABS) und Relativpositionen (REL). Der Befehl REL beinhaltet zusätzlich zur Positionsangabe noch die Anzahl äquidistanter Punkte, was gemeinsam mit der Angabe der Punktverzögerung in der CNC-Steuerung eine konstante Strahlbewegung entlang dieser Linie bewirkt. Bei der Positionsangabe wird die Auslenkung des Elektronenstrahls anteilig von -1 bis +1 zur definierten Bauraumgröße angegeben. Daraus ergibt sich bei einer

max. Bauraumgröße von $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ mit einem Wert von $+0,8$ eine Ablenkung von 40 mm in positiver Richtung.

3.4.4 Umsetzung im Rahmen des Elektronenstrahlschmelzens

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Softwaretool in den Ablauf zur Definition und Übertragung von Scanstrategien durch vier grundlegende Schritte eingebunden:

1. Der Benutzer gestaltet das zu fertigende Bauteil in einem 3D-CAD-System und führt die systemspezifische Datei anschließend in das herstellernunabhängige STL-Datenformat über. Nach der Bearbeitung dieser Datei mit einem *Slicemodul*, d. h. der Berechnung der Umrisslinien der jeweiligen Schichten, kann die CLI-Datei mit diesen Informationen erstellt werden.
2. Die CLI-Datei aus dem ersten Schritt wird in das entwickelte Softwaretool eingelesen und auf dem Baufeld platziert.
3. Nachdem die Einstellungen zur Definition von Strahlablenkwegen bestimmt wurden, wird die Datei mit den Informationen der Strahlablenkwege für die Bauteilschicht exportiert. Insbesondere Form und Größe der Teilbereiche sowie deren Füllmuster und die zugehörigen Linienabstände sind vom Anwender auszuwählen.
4. Die im dritten Schritt erzeugte Datei wird in die Strahlsteuerung importiert, sodass die definierten Strahlablenkwege für die Elektronenstrahl-Universalkammeranlage zum Ansprechen mittels Befehlen in CNC-Programmen verfügbar sind. Gemeinsam mit der Angabe der Strahlparameter im jeweiligen Programm kann somit eine vollständige Scanstrategie bestimmt werden.

Die Schritte 2 und 3 stellen in diesem Ablauf die wichtigsten Aktionen zur Erzeugung von Scanmustern bzw. -strategien dar. Der Anwender hat durch die dort bestehenden Möglichkeiten zur flexiblen Auswahl unterschiedlicher Parameterausprägungen vielfältige Freiheitsgrade zur eigenständigen Definition von Scanstrategien.

3.4.5 Einbindung in den Fertigungsablauf

Aufgrund des Anlagenaufbaus und der Steuerungsarchitektur (siehe Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2.5) werden die Schritte zur Einbindung der erzeugten Vektordatei

Schritt die Definition der Ablenkgeschwindigkeit indirekt durch die Angabe von Verweilzeiten des Strahls auf den in der Figurdatei definierten Punkte bzw. Zwischenpunkte der Vektoren. Bei einem hinreichend kleinen Punktabstand und einer angepassten Verweilzeit entsteht eine quasi kontinuierliche Ablenkung des Strahlfokus.

Weitere für das Elektronenstrahlschmelzen relevante Prozessparameter sind vor allem die Leistungsparametrierung des Elektronenstrahls, die sogenannten Strahlparameter. Durch Befehle im CNC-Programm werden die entsprechenden Werte an den Elektronenstrahlerzeuger übergeben und dort eingestellt. Dies betrifft z. B. die Strahlleistung durch die Angabe von Hochspannung und Strahlstrom oder die Fokuslage durch die Definition des Linsenstroms. Anschließend initialisiert das CNC-Programm den eigentlichen Scanvorgang. Während des Scanvorganges fährt der eingeschaltete Elektronenstrahl das Scanmuster mit definiertem Start- und Endpunkt einmal oder mehrmals ab. Im Elektronenstrahlfokus wird das metallische Pulver erhitzt, bis sich ein lokal begrenztes Schmelzbild ausbildet. Es verbindet diesen Bereich mit angrenzendem sowie mit unterhalb der Schicht liegendem, bereits verfestigtem Werkstoff, sodass sich nach Abschluss des Scanvorgangs ein verfestigter Bereich in der Form der ausgewählten Vektorfigur ausbildet. Durch die Iteration der beschriebenen Prozessschritte kann ein Bauteil hergestellt werden.

3.5 Zusammenfassung

Die vorangegangenen Abschnitte beinhalteten die Herleitung einer Methode zur Beschreibung von Scanstrategien, die für die Umsetzung an der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage K6 der Firma pro-beam AG & Co. KGaA notwendigen Modifikationen und Erweiterungen sowie die automatische Erzeugung von Vektordateien zur Beschreibung der Strahlablenkwege und deren Einbindung in den Fertigungsablauf.

Die Methode zur Beschreibung von Scanstrategien zeigt die Vielfalt der möglichen verschiedenen Elemente und deren Ausprägungen auf. Wesentlich sind die getrennte Bestimmung der beschreibenden Elemente für die beiden Bereiche *Outlining* und *Hatch* sowie die Einbindung der Elektronenstrahlparameter in die Definition einer Scanstrategie. Da durch die Kombination der Inhalte der verschiedenen Elemente einer Scanstrategie eine sehr hohe Anzahl potenzieller Lösungen erzielt werden kann, ist eine Vorgehensweise für eine zielgerichtete Reduktion des Lösungsraums ebenfalls Bestandteil des vorgestellten Vorgehens. Im Weiteren wurden erforderliche Modifikationen und Erweiterungen der Elekt-

ronenstrahl-Universalkammeranlage durchgeführt. Diese betrafen vor allem die Anlagen- und Strahlsteuerung sowie die Integration eines Auftragsmechanismus im Teilsystem Bearbeitungskammer. Hierdurch wurden die Voraussetzungen für ein funktionsfähiges System zur schichtweisen Bauteilfertigung geschaffen.

Somit konnten die Voraussetzungen und Randbedingungen, wie sie im Rahmen der Methodenentwicklung zur Beschreibung von Scanstrategien und bei der Erweiterung der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage ermittelt bzw. festgelegt wurden, erfüllt werden. Diese bilden die Basis der Umsetzung der Scanmustererzeugung in einem Softwaretool. Mit diesem Tool kann durch die Kombination von Auswahloptionen eine hohe Anzahl verschiedener Scanstrategien definiert und in die Strahlsteuerung integriert werden. Durch diese Arbeiten ist die Voraussetzung zur Befähigung der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für den Fertigungsprozess Elektronenstrahlschmelzen geschaffen. In den folgenden Kapiteln wird die Erzeugung, Analyse und Bewertung unterschiedlicher Scanstrategien mittels Prozessuntersuchungen beschrieben.

4 Analyse und Bewertung von Scanstrategien

4.1 Allgemeines

Im Rahmen der Erstellung einer allgemeinen Beschreibungsmethodik für Scanstrategien konnte gezeigt werden, dass durch die Kombination der verschiedenen Optionen eine große Anzahl Scanmuster bzw. Scanstrategien erzeugt werden kann. Für den Prozess des Elektronenstrahlschmelzens bestehen, wie in Abbildung 51 in Anlehnung an MEINDL (2005) dargestellt, neben den unmittelbar die Scanstrategie betreffenden Einflussfaktoren noch weitere. Dieses Ishikawa-Diagramm soll zur Einordnung der Scanstrategie in die Gesamtheit der Parameter dienen. Die dort vorgestellten Haupteinflussfaktoren für das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) beinhalten die Pulverschicht, den Werkstoff, das Bauteil, den Anlagenaufbau mit Bauraum, den Elektronenstrahl und das Scanmuster.

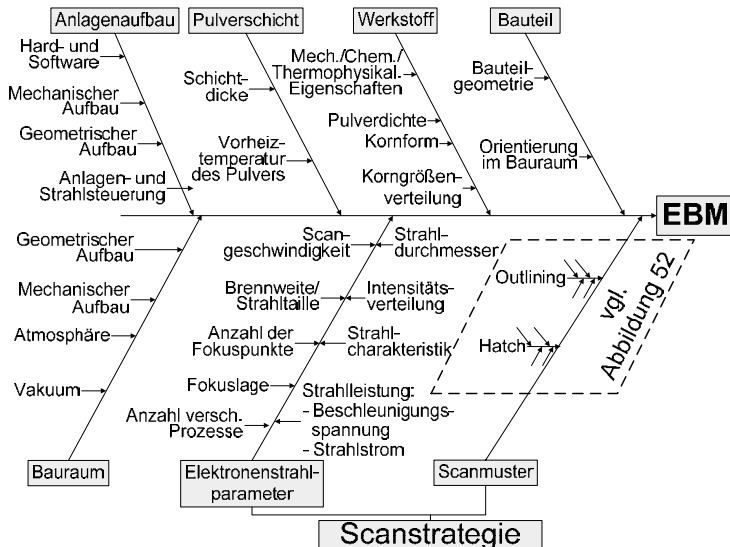


Abbildung 51: Darstellung der Einflussfaktoren auf das EBM (in Anlehnung an MEINDL 2005)

Die Zusammensetzung der betrachteten Scanstrategie aus den Haupteinflussfaktoren *Elektronenstrahlparameter* (= Energiequelle) und *Scanmuster* ist in der obigen Abbildung nochmals verdeutlicht. Aus Übersichtlichkeitsgründen ist der Ast „Scanmuster“ des dortigen Ishikawa-Diagramms in Abbildung 52 detailliert

4.1 Allgemeines

zu sehen. In dieser Darstellung wird der Aufbau der in Abschnitt 3.2 entwickelten Methode für die Beschreibung von Scanmustern den Inhalten des Ishikawa-Diagramms gegenübergestellt. Es kann hier eine deutliche Übereinstimmung erkannt werden, sodass für die weiteren Untersuchungen eine Basis zur Auswahl und Bewertung von Elementen bzw. Ausprägungen verschiedener Scanstrategien geschaffen werden kann.

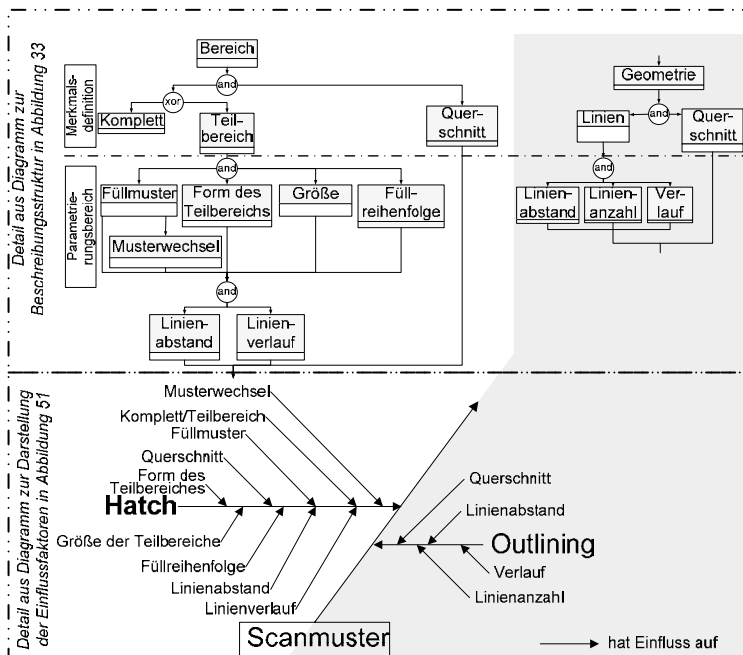


Abbildung 52: Detaillierung des Astes Scanstrategien:
Parameterübersicht und -abhängigkeiten

Um die hier gezeigten potenziellen Einflussfaktoren auf der Basis der möglichen Schranken (Definition siehe Abschnitt 3.2.7.2 auf S. 69) systematisch analysieren und bewerten zu können, wurde ein mehrstufiges Vorgehen gewählt. Da vielfältige Wechselwirkungen, insbesondere auch mit Werkstoffparametern, den Pulverkenngrößen und der aktuellen Schichtgeometrie bestehen, ist meist ein iteratives Vorgehen mit jeweils neu definierten Randbedingungen notwendig. Die erzielten Ergebnisse lassen eine Aussage über die untersuchten Optionen einer Scanstrategie zu und bieten so die Möglichkeit, ungeeignete Ausprägungen auszuschließen. Insgesamt orientiert sich dieses Vorgehen an den in Abschnitt

3.2.7.2 vorgeschlagenen Schranken zur Lösungsraumeinschränkung. Analog zu den dort erläuterten Aspekten wurden für die folgenden Untersuchungen beispielhafte Schwerpunkte ausgewählt. Beginnend mit einer Analyse und Bewertung von Scanstrategien hinsichtlich des Einsatzes beim Elektronenstrahlschmelzen auf der Basis von Expertenwissen und Literaturquellen in Abschnitt 4.2 wird eine erste Auswahl von Lösungsalternativen durchgeführt. Die Simulationsuntersuchungen in Abschnitt 4.3 stellen eine effektive Möglichkeit dar, spezifische Aspekte, insbesondere hinsichtlich der sich ausbildenden Temperaturfelder, schnell und aufwandsarm zu untersuchen. In Abschnitt 4.4 werden Wechselwirkungen des Elektronenstrahls mit dem metallischen Pulver bei verschiedenen Scanmustern betrachtet. Eine exemplarische Optimierung der Energieeinbringung durch den Elektronenstrahl wird in Abschnitt 4.5 anhand der erzeugten Bauteiloberfläche und Schichtverbindung erreicht. Abschnitt 4.6 zeigt in einer Zusammenfassung die ermittelten Potenziale auf. Abbildung 53 verdeutlicht das vorgestellte Vorgehen nochmals.

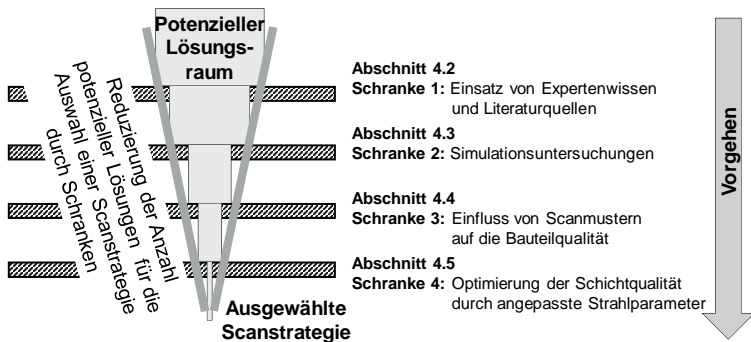


Abbildung 53: Zuordnung der ausgewählten Schranken zu den folgenden Abschnitten bei der Untersuchung verschiedener Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen im Rahmen dieser Arbeit

4.2 Schranke 1: Einsatz von Expertenwissen und Literaturquellen

4.2.1 Vorgehen

Ein durch vielfältige Untersuchungen im Bereich generativer Fertigungsprozesse gesammeltes Experten- und Erfahrungswissen stellt eine wertvolle Informations-

quelle für die Bewertung von Scanstrategien dar. Durch eine zielgerichtete Analyse und den Vergleich mit in Literaturquellen beschriebenem Wissen über Scanstrategien bzw. Parameterabhängigkeiten bei der selektiven Verfestigung eines Bauteilquerschnitts können diese Ergebnisse für die Bestimmung einer ersten Schranke genutzt werden. Insbesondere können hierdurch erwartete Eigenschaften des zu fertigenden Bauteils bereits vorab für die weitere Verwendung innerhalb der Schranke als Eingangsinformation dienen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, verschiedene Scanstrategien, Scanmuster oder Teilbereiche schnell und aufwandsarm zu vergleichen. Die dadurch erreichbare Verkleinerung eines möglichen Lösungsraums zieht eine Aufwandsreduktion in den weiteren Untersuchungen bzw. bei den in dieser Arbeit definierten Schranken zur Auswahl von Scanstrategien nach sich. Ebenfalls kann durch diese Auswahl der zu betrachtende Wertebereich für die prozessbestimmenden Parameter bereits vorab eingegrenzt werden.

Im folgenden Abschnitt werden hierzu Veröffentlichungen, die sich mit dem Schwerpunkt der Pulververfestigung mittels einer Strahlquelle beschäftigen, betrachtet. Eine Analyse findet hinsichtlich exemplarisch ausgewählter Kriterien für die Bauteilfertigung statt.

4.2.2 Bewertung der Scanstrategien hinsichtlich exemplarischer Zielgrößen

Beim Einsatz von Expertenwissen bzw. Literaturquellen zur Bestimmung von Scanstrategien müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein bzw. Restriktionen beachtet werden. Insbesondere sollte der Bediener bereits grundlegendes Prozesswissen besitzen und die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren auf den zu betrachtenden Prozess abschätzen können. Dies ist für eine Interpretation und Umsetzung der Ergebnisse auf dem jeweiligen System notwendig. Zudem muss für eine systematische Auswahl von Ausprägungen einer Scanstrategie das jeweilige Entwicklungsziel bekannt sein. Durch die betrachteten Zielgrößen wie *Qualität der Bauteiloberfläche*, *Eigenspannungen* oder *Dichte des Gefüges* kann die Optimierung der Bearbeitungsaufgabe fokussiert erfolgen. Für die ausgewählten Qualitätsmerkmale bzw. Zielgrößen ist eine Übertragbarkeit von Ergebnissen, wie sie z. B. bei laserstrahlbasierten generativen Verfahren erzielt wurden, exemplarisch möglich.

Aus mehreren Literaturquellen sind verschiedene Ansätze bekannt, um diese Zielgrößen zu optimieren. In Kapitel 2 über den Stand der Forschung und Technik wurden unterschiedliche Scanstrategien untersucht und bewertet. Für die in

dieser ersten Schranke beschriebene Anwendung von Expertenwissen und Literaturquellen wird für die weitere Erläuterung auf die dortigen Beschreibungen verwiesen. In Tabelle 7 sind beispielhaft Parameter bzw. Vorgehensweisen, welche die genannten Zielgrößen beeinflussen, aufgeführt. Durch deren Optimierung kann eine Qualitätssteigerung für die jeweilige Zielgröße erreicht werden.

Zielgröße	Exemplarische Beeinflussung bspw. durch ...	Literaturquellen (exemplarische Auswahl)
Bauteil- oberfläche	Energiedichte	DAS 2001 KRUTH ET AL. 2005A
	Ablenkgeschwindigkeit/ Leistung	BI ET AL. 2006 DAS 2001 KRUTH ET AL. 2004 XIE ET AL. 2005
	Fokuslage des Elektronenstrahls	SCHULTZ 2000
Eigen- spannungen	Unterteilung in Teilbereiche	KRUTH ET AL. 2004 SCHUTZRECHT DE10042134C2 2003 SCHUTZRECHT DE 10317822A1 2004 SCHUTZRECHT DE4309524C1 1993 TRENKE 2002
	angepasste Füllreihenfolgen	KRUTH ET AL. 2004 SCHUTZRECHT DE10042134C2 2003 SCHUTZRECHT DE 10317822A1 2004
	Wechsel der Scanrichtung in versch. Schichten	KRUTH ET AL. 2004 SCHUTZRECHT US 5155324A 1992 SIMCHI & POHL 2003
	neuartige Scanmuster (z. B. Spiralen, FASS-Kurven)	COX ET AL. 1994 DAI & SHAW 2002 MA & BIN 2007 YANG ET AL. 2003
Dichte des Gefüges	<i>Hatch</i> linienabstand	DAS 2001 MEINERS 1999 SIMCHI & POHL 2003 XIE ET AL. 2005 YADROITSEV ET AL. 2007
	Ablenkgeschwindigkeit/ Leistung	KRUTH ET AL. 2004 SIMCHI & POHL 2003 XIE ET AL. 2005
	Energiedichte	KRUTH ET AL. 2004 KRUTH ET AL. 2005A SIMCHI & POHL 2003

Tabelle 7: Übersicht der aus Literaturquellen ermittelten Zusammenhänge zur Beeinflussung ausgewählter Zielgrößen

4.2 Schranke 1: Einsatz von Expertenwissen und Literaturquellen

Diese Auswahl an veröffentlichten Untersuchungen hinsichtlich der genannten Zielgrößen zeigt, dass für eine erste Optimierung bzw. für eine angepasste Parameterauswahl Erkenntnisse bspw. hinsichtlich einer hochwertigen Bauteiloberfläche, geringer Eigenspannungen oder der Dichte des Gefüges genutzt werden können. Trotz der zwischen den Parametern oftmals bestehenden Wechselwirkungen lassen sich u. a. mit den oben aufgeführten Veröffentlichungen für das zu fertigende Bauteil entsprechende Parameterbereiche oder Optionen eingrenzen.

4.2.3 Zusammenfassung

Die aufgeführten Veröffentlichungen zu Scanstrategien mit den beinhaltenden Strahlparametern und Scanmustern verdeutlichen deren vielfältige Wechselwirkungen. Für die weitere Berücksichtigung im Rahmen der Arbeit ist zu beachten, dass

- Eigenspannungen u. a. durch die geeignete Wahl der Reihenfolge der Verfestigung von Teilbereichen oder durch angepasste Füllmuster positiv beeinflusst werden;
- die Dichte des Gefüges u. a. von den Strahlparametern wie z. B. der Strahlleistung oder der Ablenkgeschwindigkeit bzw. vom *Hatch*linienabstand bestimmt wird;
- die Oberflächengüte vor allem durch das Zusammenwirken der Strahlleistung mit der Ablenkgeschwindigkeit bzw. durch die Wahl angepasster Füllmuster, die Unterteilung in Teilbereiche und den gewählten *Hatch*linienabstand bestimmt wird. Weiterhin sind bei der Bestimmung der Teilbereiche deren Größe und die Füllreihenfolge relevant.

In Tabelle 8 ist eine Zusammenfassung der aus verschiedenen Literaturquellen bekannten Abhängigkeiten zum Erreichen bzw. zur Optimierung möglicher Zielgrößen dargestellt.

Schranke 1: Einsatz von Expertenwissen und Literaturquellen	Zielgröße	Strahlparameter				Scannmuster	Unterteilung in Teilbereiche				Größe der Teilbereiche				Hatchabstand				Scanrichtung
		Leistung	Ablenk- geschwindigkeit	Energiedichte	Fokusslage		Füllreihenfolge	stochastisch	größter Abstand des aktuell zu verfügbaren Teilbereiches zu dem im vorhergehenden Schritt bearbeiteten Teilbereich	Füllmuster	x-Hatch	xy-Hatch (alternierend)	neue Füllmuster (Spirale, FASS-Kurve, ...)						
Eigenspannungen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Dichte	x	x	x	x	x			x	x	x	x								
Oberflächengüte	x	x	x	x	x	x			x	x			x	x					
X - Eine Erhöhung des Erfüllungsgrades der Zielgrößen durch Optimierung hinsichtlich des ausgewählten Parameters möglich.																			

Tabelle 8: Zusammenfassende Übersicht des Einflusses von Elementen einer Scanstrategie auf die im Rahmen der Schranke 1 exemplarisch ausgewählten und analysierten Zielgrößen

4.3 Schranke 2: Simulationsuntersuchungen

4.3.1 Allgemeines

Simulationsuntersuchungen stellen für die Entwicklung neuer Fertigungsprozesse und für deren Umsetzung im Produktionsumfeld wichtige Informationsquellen dar. Durch das Abbilden komplexer Sachverhalte mittels mathematischer Abhängigkeiten und das Übertragen in ein rechnerbasiertes Modell kann bspw. der Einfluss verschiedener Größen auf das zu untersuchende System bestimmt werden. Für die Durchführung solcher Berechnungen hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) als ein effektives und leistungsfähiges Werkzeug erwiesen. Diese Methode kann bei unterschiedlichen physikalischen Fragestellungen wie u. a. der Simulation unterschiedlicher Lastzustände von Körpern, der Mehrkörpersimulation, der thermischen Simulation oder der strukturellen Berechnung eines Bauteils eingesetzt werden (MÜLLER 2009). Wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise gegenüber Fertigungsversuchen mit der jeweiligen Fertigungsanlage ist, dass z. B. große Systeme einfach untersucht bzw. Fertigungsprozesse mit den zugehörigen Wechselwirkungen auch im unmittelbaren Wirkbereich näher betrachtet werden können. Zudem lässt sich oftmals eine deutliche Zeit- und Kosteneinsparung durch die mögliche Reduzierung realer Versuche und die einfache Variation von Eingangsgrößen erzielen. Ein zusätzlicher Gesichtspunkt ist die Nutzung der so erhaltenen Daten als Eingangsinformationen für die Gestaltung und Interpretation von Fertigungsversuchen in der weiteren Bauteil- oder Prozessoptimierung.

Vorteile können durch diese Methode für die Entwicklung des Elektronenstrahl-schmelzens vor allem hinsichtlich einer schnellen Untersuchung neuer Scanstrategien, der Analyse thermischer Effekte und der Untersuchung des Einflusses verschiedener Strahlparameter erreicht werden. Hierfür werden zunächst in den folgenden Abschnitten der Aufbau des zugehörigen Simulationsmodells (Abschnitt 4.3.2) und die Zielsetzung (Abschnitt 4.3.3) beschrieben. Nach der Vorstellung der Vorgehensweise in Abschnitt 4.3.4 werden in Abschnitt 4.3.5 anhand dieses Modells die Auswirkungen verschiedener Strahlparameter auf das thermische System exemplarisch erläutert und daraus in Abschnitt 4.3.6 verbesserte, sogenannte adaptive Scanstrategien abgeleitet. Abschließend wird in Abschnitt 4.3.7 die Umsetzung der neu gestalteten Strategien in Versuchen an der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage beschrieben.

4.3.2 Simulationsmodell

Die Struktursimulation liefert wertvolle Aussagen über das resultierende instationäre Temperaturfeld und das Verzugsverhalten von generativ gefertigten Bauteilen. Bei Modellierung des Fertigungsverfahrens Elektronenstrahlschmelzen wird dieses in die drei Teilsysteme Strahl, Material und Prozess strukturiert. Für die Berechnung des Gesamtsystems werden thermische und thermomechanische Simulationsroutinen eingesetzt (vgl. Abbildung 54). Als Eingangsgröße für die thermische Simulation dienen die zu untersuchenden realen Scanstrategien. Durch Translation einer normalverteilten Energiequelle entlang einzelner Scanlinien in einer vernetzten Geometrie und die Wechselwirkung eines mathematisch abstrahierten Wärmequellenmodells mit dem Modell des Pulverwerkstoffs erfolgt die Vorhersage des Temperaturfeldes. Dieses kann wiederum als Eingangsgröße für eine thermomechanische Berechnung dienen.

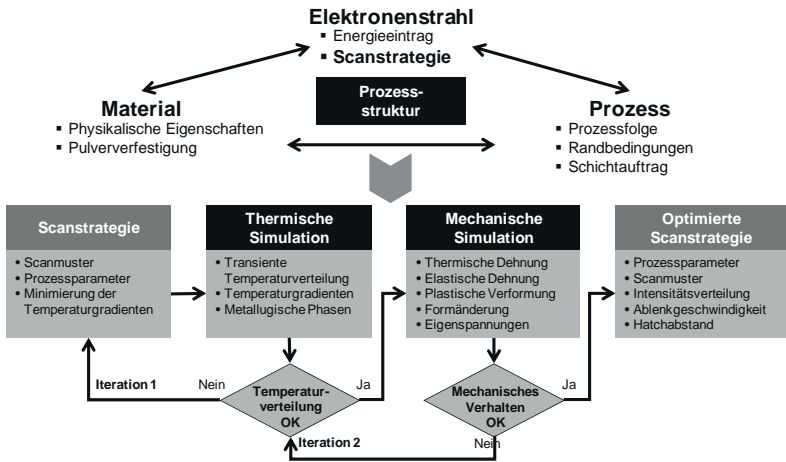


Abbildung 54: Simulationmethode zur Modellierung der schichtweisen Fertigung (ZAEH ET AL. 2007A)

Aufgrund der verglichen mit dem Laserstrahlschmelzen deutlich höheren Strahlleistungen und Ablenkgeschwindigkeiten liegt für das Elektronenstrahlschmelzen das Hauptaugenmerk zunächst auf der Vorhersage der instationären thermischen Temperaturfelder, der Temperaturverteilung sowie der daraus resultierenden Abkühlkurven, wie sie sich aus dem Einbringen einer bewegten Wärmequelle in der Struktur ergeben. Im Hinblick auf die Berechnung dieser sich zeitlich verändernden Temperaturfelder im Rahmen einer thermischen Simulation ist die Bauteilgeometrie, dargestellt als ein CAD-Modell einzelner Pulverschichten, ein wichtiger Ausgangspunkt. Dieses Modell kann über definierte Schnittstellen in die FE-Simulation implementiert werden. Weitere zu berücksichtigende Wärmetransportphänomene, die für die Berechnung der Temperaturfelder während des Elektronenstrahlschmelzens notwendig sind, sind u. a. die Wärmestrahlung bzw. die Wärmeleitung. Dabei greift die thermische Simulation auf zwei speziell für schichtweise Fertigungsverfahren erforderliche Beschreibungen des Prozesses zu. Die Modellierung des Schichtauftrags und die der eingesetzten Wärmequelle *Elektronenstrahl* sind hierbei zu nennen. Der signifikanteste Unterschied zu Prozesssimulationen wie z. B. für das Strahlschweißen ist, dass der Schichtauftrag durch die Aktivierung bzw. Deaktivierung der finiten Elemente der jeweiligen Schicht abgebildet wird. Für die Beschreibung der Materialeigenschaften werden temperaturabhängige Materialkennwerte bspw. der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität oder der Dichte in das Berechnungsmodell

4.3 Schranke 2: Simulationsuntersuchungen

integriert. Auch werden diese Werte nach Überschreiten der Schmelztemperatur am jeweiligen finiten Element irreversibel von pulverförmig auf fest geändert. Die durch die Gauß'sche Energieverteilung im Fokus bzw. durch die applizierte Scanlinie beschriebene Wärmequelle greift auf die eingestellten Prozessparameter wie z. B. Strahlleistung, Fokusbereich, Ablenkgeschwindigkeit und *Hatch*linienabstand zu. Das Zusammenwirken der beschriebenen Teilsysteme mit Parametern des Elektronenstrahlschmelzens ermöglicht somit dessen analytische Betrachtung. Abbildung 55 gibt einen Überblick über die Bestandteile des hier untersuchten thermischen Simulationsmodells.

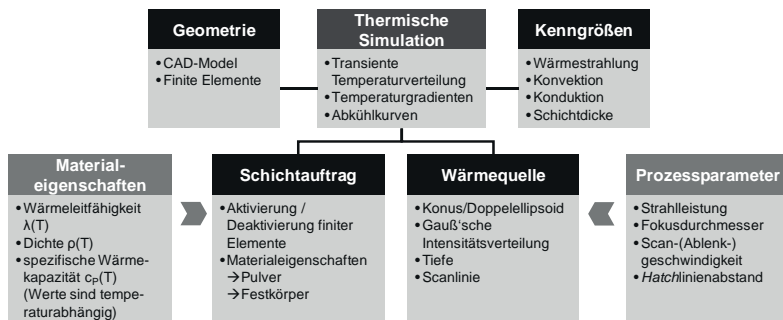


Abbildung 55: Berechnungsfunktionen und -parameter des erstellten Simulationsmodells (ZAEH ET AL. 2007B)

Wegen des oben beschriebenen Einsatzes eines mathematisch abstrahierten Wärmequellenmodells ist eine direkte quantifizierte Ableitung realer Prozessparameter nur begrenzt durchführbar. Jedoch erlaubt die numerische Simulation die Bestimmung realistischer Bereiche von Skalierungsfaktoren für die Prozessparameter in einem Bauprozess (BRANNER ET AL. 2006). Hierdurch können wertvolle Tendenzen zur Vorhersage geeigneter Parameterfenster abgeleitet werden.

4.3.3 Ziele

Im Rahmen dieser Untersuchungen sollten insbesondere die spezifischen Eigenschaften zur Energieeintrags des Elektronenstrahls in metallisches Pulver evaluiert werden. Gegenstände dieser Analyse sind die Auswirkungen der stark erhöhten Werte von Leistung, Leistungsdichte und Ablenkgeschwindigkeiten. Betrachtungsschwerpunkte bei den thermischen Effekten in der Pulverschicht sind die Wechselwirkungen aufgrund des hohen Energieniveaus durch das Vor-

heizen in der Pulverschicht während des Scanvorgangs sowie die Auswirkungen bei einer Geschwindigkeitsänderung der Strahlablenkung.

Aus den Ergebnissen dieser Simulationsuntersuchungen sollen adaptive Scanstrategien, bei denen das Verhältnis von Strahlleistung zu Ablenkgeschwindigkeit (P/v) bestimmt wird, abgeleitet werden. Wesentlich ist hierfür eine an die jeweiligen Umgebungsbedingungen während der Verfestigung angepasste Strahlleistung. Anhand zweier exemplarischer Untersuchungen sollen Skalierungsfaktoren für die Elektronenstrahlparameter *Strahlleistung* und *Ablenkgeschwindigkeit* ermittelt werden, um zum einen die thermischen Wechselwirkungen von verfestigten und nicht verfestigten Bereichen einer Schicht und zum anderen die spezifischen Effekte beim Einsatz hoher Ablenkgeschwindigkeiten abzubilden.

4.3.4 Vorgehensweise und untersuchte Parameter

Zum Abgleich der Simulationsergebnisse mit Daten aus realen Versuchen sind ein abgestimmtes Vorgehen sowie eine Definition zu untersuchender Prozessvariationen notwendig. Hierfür wurde zunächst das Simulationsmodell an die im zu betrachtenden System vorherrschenden Bedingungen angenähert. Neben der Abbildung des grundlegenden geometrischen Aufbaus wurden auch die verschiedenen Prozessschritte wie bspw. der Pulverauftrag oder das Vorheizen modelliert. Darüber hinaus erfolgte die Auswahl und Variation der Strahlparameter wie auch des Scanmusters analog zu den in den Simulationsuntersuchungen betrachteten Parameterveränderungen.

Die Prozessparameter und die weiteren Eingangsparameter für die Berechnung wurden im Simulationsmodell für einen konstanten *Hatch*linienabstand von 0,1 mm und eine Kantenlänge von 2 mm kalibriert. Als Werkstoffdaten wurden die Kennwerte von Pulver der Legierung 1.2343 (X38CrMoV5-1) mit einer durchschnittlichen Korngröße von 32 μm bis 62 μm implementiert. Die anschließende Strahlablenkung findet zunächst in x-Richtung (x-Scan 1, x-Scan 2) statt, bevor diese in die y-Richtung (y-Scan 1, y-Scan 2) wechselt, sodass als Scanmuster das Schachbrettmuster entsteht (siehe Abbildung 56). Die gewählte Abfolge der Scanvektoren entspricht der realen Scanstrategie, die in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage eingesetzt wird. Auch beinhalten die *Hatch*linien Umkehrpunkte, was bedeutet, dass die Scanrichtung zwischen zwei aufeinander folgenden Linien wechselt.

4.3 Schranke 2: Simulationsuntersuchungen

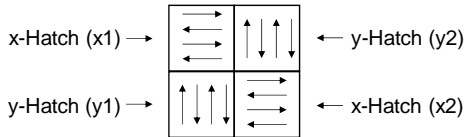


Abbildung 56: In der Simulation angewandte Scanstrategie

Ebenso wurden bei allen Berechnungen identische Werkstoffkenngrößen und ein identisches Werkstoffverhalten vorausgesetzt. Beim Erreichen der Schmelztemperatur ($T_S = 1425^\circ\text{C}$) an einem Berechnungsknoten werden mehrere Werkstoffkennwerte, bspw. der Wert der Dichte oder der thermischen Leitfähigkeit, irreversibel von Pulver auf Feststoff geändert.

Mit den beschriebenen Parametern und dem Vorgehen wurden zum Erreichen der oben genannten Ziele zunächst – als erster Anwendungsfall sowie als Referenz – die Auswirkungen der eingebrachten Energie bei einer konstanten Strahlleistung und Strahlgeschwindigkeit auf die unterschiedlichen Bereiche der Schicht bestimmt. Eine erste Erweiterung war die Veränderung der zeitabhängigen Temperaturverteilung bei einer Verdopplung der Ablenkgeschwindigkeit (Anwendungsfall 2). Auf der Basis der Ergebnisse aus den beiden Simulationen fand in einem weiteren Schritt als Anwendungsfall 3 bzw. 4 die Anpassung der Leistung zur Definition einer adaptiven Scanstrategie in diesen beiden Fällen statt. Hierfür wurde die Elektronenstrahlleistung durch die Festlegung von Skalierungsfaktoren angepasst. Die beschriebenen Anwendungsfälle sind in Tabelle 9 aufgeführt.

	Referenz	Adaptive Scanstrategie
Nominale Ablenkgeschwindigkeit	Anwendungsfall 1: keine Anpassung der Elektronenstrahlleistung für die verschiedenen <i>Hatch</i> bereiche	Anwendungsfall 3: angepasste Elektronenstrahlleistung für verschiedene <i>Hatch</i> bereiche durch Skalierungsfaktoren
Doppelte Ablenkgeschwindigkeit	Anwendungsfall 2: verdoppelte Elektronenstrahlleistung ohne weitere Anpassung für die verschiedenen <i>Hatch</i> bereiche	Anwendungsfall 4: angepasste erhöhte Elektronenstrahlleistung für verschiedene <i>Hatch</i> bereiche durch Skalierungsfaktoren

Tabelle 9: Für die Definition von adaptiven Scanstrategien betrachtete Anwendungsfälle

4.3.5 Auswirkungen der Energieeinbringung

Wie im Rahmen der Vorgehensbeschreibung erläutert, wurde zunächst das zeitabhängige Temperaturverhalten verschiedener zu verfestigender Bereiche untersucht. Dabei dienen die eingebrachte Leistung (P_1) und die Ablenkgeschwindigkeit des Elektronenstrahls (v_1) als Vergleichsbasis für die weiteren Simulationsberechnungen hinsichtlich einer verdoppelten Ablenkgeschwindigkeit ($v_2 = 2 \times v_1$) bzw. der damit einhergehenden verdoppelten Strahlleistung ($P_2 = 2 \times P_1$). Abbildung 57 stellt nochmals die für die Berechnung der Ausgangsbasis variierten Parameter dar.

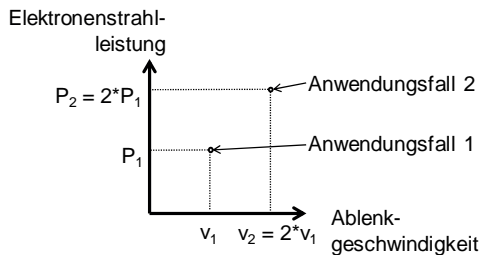


Abbildung 57: Für die Berechnung der Ausgangsbasis variierte Parameter

Abbildung 58 zeigt hierzu für den Anwendungsfall 1 den Temperaturverlauf mehrerer Berechnungsknoten im Zentrum des jeweiligen Teilbereichs des Schachbrettmusters. Die Starttemperatur von 1050 °C ist, wie beschrieben, durch das Vorheizen der gesamten Pulverschicht bedingt. Der Start der Berechnung ($t = 0\text{ s}$) wird mit dem Ende des Pulvervorheizens und somit dem Beginn der Ablenkbewegung des fokussierten Elektronenstrahls definiert, sodass sich die Zeitangaben in den Diagrammen auf diesen Zeitpunkt beziehen. Nachdem die mathematisch abstrahierte Wärmequelle die jeweiligen Knoten in der Simulation überstrichen hat, steigt deren Temperatur mit einem hohen Gradienten an. Das Erreichen der Schmelztemperatur $T_s = 1425\text{ °C}$ während des Scannens der *x-Hatch*bereiche dient als Nachweis einer kontrollierbaren und prozesssicheren Verfestigung des dort aufgetragenen metallischen Pulvers. Die im Vergleich hierzu erhöhten Temperaturen bei der Verfestigung der *y-Hatch*bereiche deuten jedoch darauf hin, dass der zusätzliche Wärmeeintrag aus den Schmelzbädern der *x-Hatch*bereiche den dortigen Wärmehaushalt zusätzlich zur Vorheiztemperatur beeinflusst. Es werden deutlich höhere Temperaturen und hierdurch auch geänderte Prozessbedingungen erzeugt. Dieser Effekt führt dazu, dass einzelne Felder

4.3 Schranke 2: Simulationsuntersuchungen

über die vordefinierten Umrundungen hinweg verfestigt werden und keine deutliche Feldbegrenzung mehr sichtbar ist (ZÄH ET AL. 2007C). Die realisierbare Prozesssicherheit nimmt deswegen stark ab. Für die weitere Bearbeitung ist die Energiemenge während der Verfestigung in y-Richtung durch das Reduzieren der Elektronenstrahlleistung anzupassen.

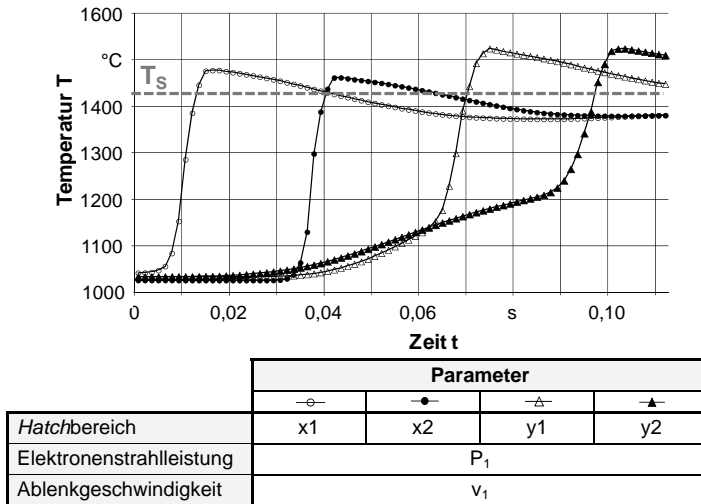
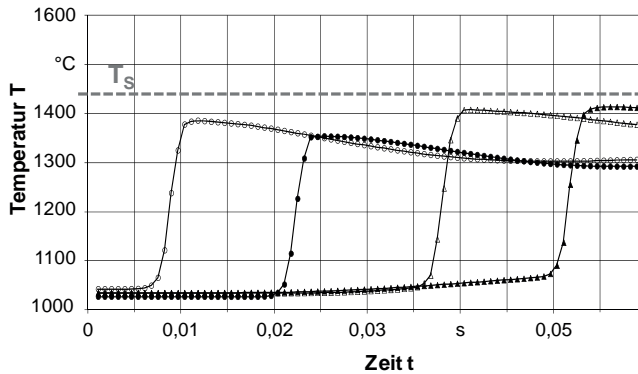


Abbildung 58: Temperaturverlauf bei konstanter Strahlleistung und Ablenkgeschwindigkeit (Anwendungsfall 1)

Im Weiteren konnten als Anwendungsfall 2 unter der Annahme eines identischen Energieeintrags während der Verfestigung der Pulverschicht sowohl die Ablenkgeschwindigkeit v als auch die Elektronenstrahlleistung P in der thermischen Simulation verdoppelt werden ($P_2 = 2 \times P_1$ bzw. $v_2 = 2 \times v_1$). Die sonstigen prozessbestimmenden Kenngrößen, wie bspw. Hatchlinienabstand, Wärmestrahlung oder Materialkennwerte, wurden gegenüber der vorigen Untersuchung nicht verändert.

Wie dem Temperaturverlauf des Diagramms in Abbildung 59 zu entnehmen ist, genügt eine Verdopplung der Elektronenstrahlleistung ($P_2 = 2 \times P_1$) bei verdoppelter Ablenkgeschwindigkeit ($v_2 = 2 \times v_1$) nicht für eine homogene Ausprägung eines Schmelzbades. Die für den Werkstoff notwendige Schmelztemperatur $T_s = 1425 \text{ °C}$ konnte bei den gewählten Parameterausprägungen nicht in der gesamten zu verfestigenden Fläche erreicht werden. Eine Anpassung der Strahl-

leistung ist daher erforderlich, um auch bei hohen Ablenkgeschwindigkeiten metallisches Pulver prozesssicher aufzuschmelzen und zu verfestigen.



	Parameter			
	—○—	—●—	—△—	—▲—
Hatchbereich	x1	x2	y1	y2
Elektronenstrahlleistung	$P_2 = 2 \times P_1$			
Ablenkgeschwindigkeit	$v_2 = 2 \times v_1$			

Abbildung 59: Temperaturverlauf bei einer Elektronenstrahlleistung $P_2 = 2 \times P_1$ und einer Ablenkgeschwindigkeit $v_2 = 2 \times v_1$ (Anwendungsfall 2)

4.3.6 Steigerung der Prozessqualität durch adaptive Scanstrategien

Für die beiden im vorigen Abschnitt beschriebenen Anwendungsfälle 1 und 2 wurde unter der Annahme einer hohen Leistung und Ablenkgeschwindigkeit des Elektronenstrahls eine Parameteroptimierung durchgeführt. Es sollten Skalierungsfaktoren für die Bestimmung der Elektronenstrahlleistung ermittelt werden, um die für die Legierung erforderliche Schmelztemperatur von $T_S = 1425 \text{ °C}$ präzise zu erreichen. Als adaptive Scanstrategie zum Anwendungsfall 1 mit der Ablenkgeschwindigkeit v_1 konnte für den korrespondierenden Anwendungsfall 3 als Skalierungsfaktor der Wert 0,8 für die Verfestigung der y-Hatchbereiche ermittelt werden. Wie in Abbildung 60 zu sehen, konnte mit der Strahlleistung $P_1' = P_1$ für die x-Hatchbereiche sowie mit $P_1'' = 0,8 \times P_1$ für die y-Hatchbereiche das dortige Temperaturniveau abgesenkt werden (vgl. schwarz gegenüber grau dargestellte Linien in Abbildung 60), sodass hierdurch gleich bleibende Maximaltemperaturen für beide Scanrichtungen sichergestellt werden. Mithilfe dieser Leistungsskalierung schmilzt der fokussierte Elektronenstrahl das metallische Pulver in den durch das Scanmuster begrenzten Bereichen auf und verfestigt

4.3 Schranke 2: Simulationsuntersuchungen

den gewählten Ausschnitt. So kann für den Fertigungsprozess eine erhöhte Geometriegenauigkeit erreicht werden.

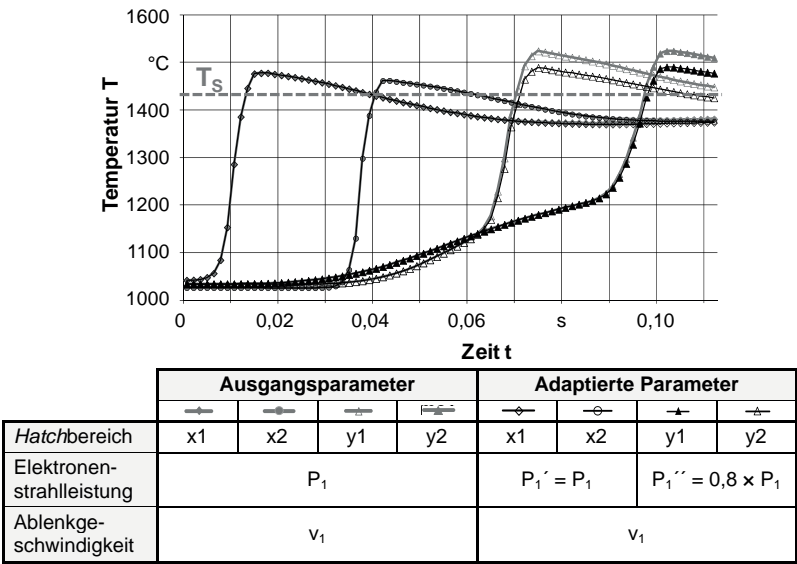


Abbildung 60: Temperaturverlauf bei skalierter Elektronenstrahlleistung P_1' und P_1'' und Ablenkgeschwindigkeit v_1 (Anwendungsfall 3)

Analog zu den oben beschriebenen Simulationsberechnungen wurde im Anwendungsfall 4 auch für die Versuche mit doppelter Ablenkgeschwindigkeit eine iterative Optimierung der Strahlleistung durchgeführt. Wie in Abbildung 61 dargestellt, musste für eine deutliche Steigerung der Prozesssicherheit durch adaptiv angepasste Strahlparameter eine Temperaturerhöhung in den x-Hatchbereichen um über 100 K und in den y-Hatchbereichen um 50 K erzielt werden. Die Ergebnisse der thermischen Simulation zeigen, dass hierfür eine Steigerung der Strahlleistung von zusätzlich ca. 35 % bei den zuerst verfestigten x-Hatchbereichen und von zusätzlich ca. 10 % bei den in der Folge verfestigten y-Hatchbereichen gegenüber der verdoppelten Ausgangsleistung notwendig ist. Somit ergeben sich Skalierungsfaktoren von 2,7 für den x-Hatchbereich und 2,2 für den y-Hatchbereich.

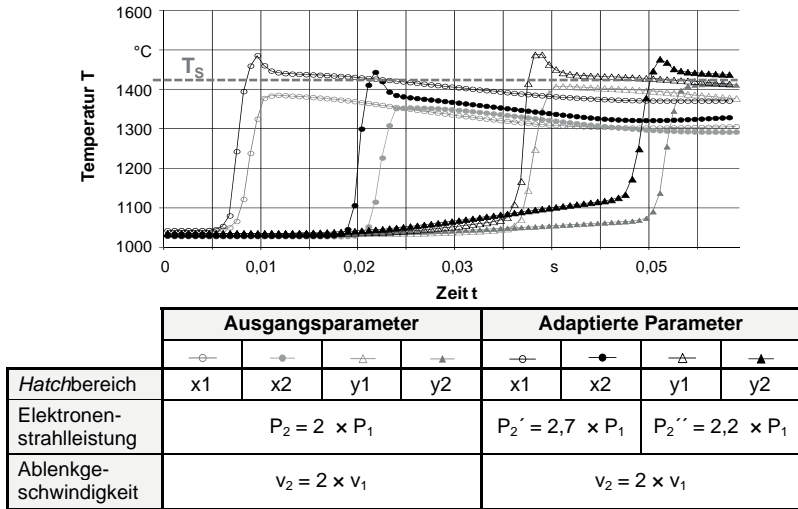


Abbildung 61: Temperaturverlauf bei skalierter Elektronenstrahlleistung und verdoppelter Ablenkgeschwindigkeit (Anwendungsfall 4)

Abbildung 62 stellt nochmals die verwendeten Simulationsbedingungen für die beiden untersuchten Fälle der adaptiven Scanstrategien für die Anpassung der Strahlleistung für verschiedene Bereiche bei einer nominalen und einer verdoppelten Ablenkgeschwindigkeit des Elektronenstrahls einander gegenüber. Hieraus ist ersichtlich, dass eine lineare Anpassung der Elektronenstrahlleistung für geänderte Ablenkgeschwindigkeiten nicht ausreichend ist.

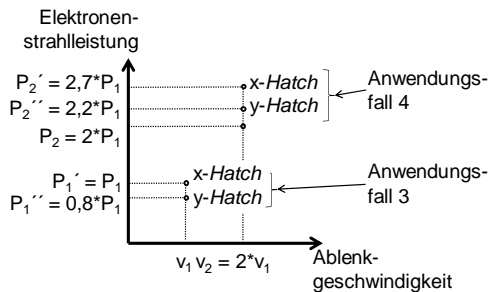


Abbildung 62: Im Simulationsmodell ermittelte Skalierungsfaktoren zur Definition von adaptiven Scanstrategien

4.3.7 Validierung der Effekte durch Prozessuntersuchungen

Die im Rahmen der Arbeit in den vorhergehenden Abschnitten vorgestellten Simulationsergebnisse offenbaren aufgrund der sequenziellen Abfolge deutliche Unterschiede für die Bereiche mit einem in x- bzw. in y-Richtung orientierten Scanmuster. Dies gilt insbesondere für die zu einer prozesssicheren Verfestigung benötigte Energiemenge. Hierdurch steigt die erforderliche Elektronenstrahlleistung bei einer Erhöhung der Ablenkgeschwindigkeit überproportional an.

Die Validierung des Vorgehens einer adaptiven Leistungsanpassung des Elektronenstrahls zum Ausgleich der beschriebenen Effekte ungleichmäßiger Maximaltemperaturen in den thermischen Simulationen erfolgte anhand von Prozessuntersuchungen an der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage. Hierzu wurde eine metallische Pulverschicht mit einem zur Simulation vergleichbaren Scanmuster und einer angepassten Elektronenstrahlleistung verfestigt. Das definierte Scanmuster beinhaltet je vier quadratische Bereiche mit einer Kantenlänge von je 10 mm in x- und in y-Richtung. Analog zum Aufbau des Simulationsmodells bestand eine alternierende Abfolge der Bereiche mit einem x- bzw. *y-Hatch*, während die Verfestigung sequenziell durchgeführt wurde.

Wie im Rahmen der Eingangsparameter für die Simulation festgelegt, wurde für die Versuchsdurchführung ebenfalls ein Pulver der Legierung 1.2343 (X38CrMoV5-1) mit einer durchschnittlichen Korngröße von 32 μm bis 62 μm ausgewählt. In Anlehnung an die vorausgehend erfolgten thermischen Berechnungen wurde der Energieeintrag der Bereiche des *y-Hatches* angepasst und die Elektronenstrahlleistung bei verdoppelter Ablenkgeschwindigkeit zusätzlich erhöht. Die durchgeführten Experimente hatten Ablenkgeschwindigkeiten von $v_1 = 3000 \text{ mm/s}$ und $v_2 = 6000 \text{ mm/s}$ sowie eine Elektronenstrahlleistung von $P = 450 \text{ W}$ bis zu $P = 1600 \text{ W}$. Als *Hatch*linienabstand wurde der konstante Wert $h = 0,1 \text{ mm}$ ausgewählt. Das Verfestigen eines quadratischen Teilbereichs erforderte $t = 0,33 \text{ s}$ (bei $v = 3000 \text{ mm/s}$) bzw. $t = 0,16 \text{ s}$ (bei $v = 6000 \text{ mm/s}$). Das Scannen des gesamten Musters mit dem bewegten Elektronenstrahlfokus erfolgte daher in 5,33 s bzw. 2,66 s.

In Abbildung 63 ist eine Übersicht der variierten Parameter mit dem zugehörigen Scanmuster dargestellt. Das Verhältnis der eingebrachten Strahlleistung des *x-Hatches* zu der des *y-Hatches* wird aufgezeigt, welches bei Erhöhung der Ablenkgeschwindigkeit und Strahlleistung leicht von 1,18 auf 1,3 anstieg. Bei Experimenten mit einer verdoppelten Ablenkgeschwindigkeit wurde eine 2,7-fache (Exp. 2 in Abbildung 63) bzw. eine 3,11-fache (Exp. 3 in Abbildung 63) Strahl-

leistung gegenüber Exp. 1 eingebracht. Somit konnten in Exp. 1 zuerst die Effekte einer angepassten Elektronenstrahlleistung für die verschiedenen Bereiche einer Schicht wie auch im Weiteren die einer stark erhöhten Ablenkgeschwindigkeit untersucht werden. In Abbildung 63 ist zusätzlich die Oberfläche aus Exp. 1 als Ausgangspunkt dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass es mit den angepassten Parametern möglich war, eine homogene Oberfläche mit deutlich abgegrenzten, aber trotzdem untereinander verbundenen Bereichen herzustellen. Diese Strategie stellt sicher, dass der zusätzliche Energieeintrag aus den bereits verfestigten Bereichen berücksichtigt wird und so bspw. keine Poren aufgrund einer erhöhten Energiemenge auftreten.

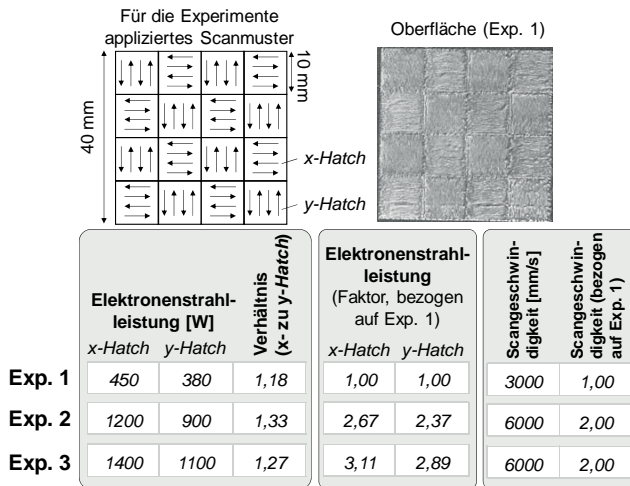


Abbildung 63: Scanmuster und Parameter der Versuche mit adaptiven Scanstrategien an der modifizierten Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

Die Ergebnisse der Variation der Ablenkgeschwindigkeit und der zugehörigen Strahlleistung sind in Abbildung 64 dargestellt. Dabei werden Ausschnitte der in Exp. 1 bis 3 erzeugten Oberflächen gezeigt. Hieraus wird deutlich, dass eine Erhöhung der Ablenkgeschwindigkeit in Kombination mit einer Variation der Elektronenstrahlleistung noch zu einem stabilen Prozess des Elektronenstrahlschmelzens führte. Hingegen sind Unterschiede zu den in der thermischen Simulation ermittelten Skalierungsfaktoren zu beobachten. Die Oberflächenqualität konnte durch eine, verglichen mit den Simulationsergebnissen, höhere Leistungsskalierung gesteigert werden (vgl. Exp. 3). Trotzdem ist eine weitere Optimie-

4.3 Schranke 2: Simulationsuntersuchungen

rung der Oberflächenqualität verglichen mit Exp. 1 unumgänglich (vgl. Exp. 2 und 3). Hierfür spielen Effekte wie spezifische Strahl-Stoff-Wechselwirkungen, höhere Temperaturgradienten im Bereich des Strahlfokus oder Schmelzbaddynamiken eine wesentliche Rolle.

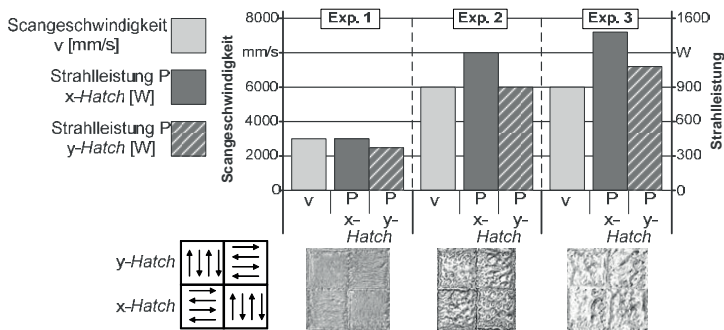


Abbildung 64: Vergleich der mit verschiedenen Parametervariationen von Strahlleistung und Ablenkgeschwindigkeit im Rahmen der adaptiven Scanstrategien (Exp. 1 bis Exp. 3) erzeugten Oberflächen

4.3.8 Zusammenfassung

Die für die Bestimmung des Einflusses von Scanstrategien beim Elektronenstrahlschmelzen durchgeführten Simulationsuntersuchungen sowie der Vergleich mit den begleitenden Arbeiten an der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage belegen, dass mithilfe dieser Untersuchungen prozessbedingte Effekte im Voraus berechnet werden können. Versuchsaufwand kann auf diese Weise eingespart werden kann. Dieses Vorgehen stellt ein leistungsfähiges Werkzeug dar, um den Benutzer bei der Auswahl einer geeigneten Scanstrategie zu unterstützen.

Insbesondere Skalierungsfaktoren für die hier betrachtete Anpassung der Elektronenstrahlleistung verbessern die Prozessqualität und -stabilität. Diese Anpassungen müssen sowohl hinsichtlich einer veränderten Ablenkgeschwindigkeit als auch hinsichtlich des thermischen Einflusses von kurz zuvor bereits verfestigten Bereichen auf noch nicht verfestigte Bereiche des Schichtquerschnitts bestimmt werden. Die Implementierung führt zu einer adaptiven Scanstrategie. Für die Auswahl und die Definition von Strahlparametern für das Elektronenstrahlschmelzen ist zu beachten, dass bei großen relativen Änderungen der Ablenkgeschwindigkeit die Elektronenstrahlleistung nicht linear angepasst werden kann. Im Rahmen der Auswahl von Scanstrategien bedeutet dies, dass die Strahlpara-

meter nur individuell, auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt, ausgewählt werden können.

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

4.4.1 Allgemeines

Scanmuster bestimmen u. a. die Prozesssicherheit und die Bauteilqualität, die während des selektiven Aufschmelzens und Verfestigens erzielt werden kann, entscheidend mit. Um die Eigenschaften der in dieser Arbeit in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage K6 implementierten Scanmuster zu bewerten, wurde ein systematisches Vorgehen gewählt. In Abschnitt 4.4.2 werden zunächst die Ziele und das Vorgehen für diese Untersuchungen geplant. Abschnitt 4.4.3 beschreibt die Durchführung und Abschnitt 4.4.4 die Auswertung der Untersuchungen. Eine zusammenfassende Darstellung in Abschnitt 4.4.5 erläutert nochmals den Einfluss der Scanmuster.

4.4.2 Ziel der Untersuchungen und Versuchsplanung

Für diese Untersuchungen der Scanmuster sind die in Abschnitt 3.2 ermittelten Zusammenhänge zu deren Beschreibung zu berücksichtigen. Analog zu dem in Abschnitt 4.1 gezeigten Ishikawa-Diagramm (Abbildung 51 und Abbildung 52) wurden nochmals die wichtigsten Einflussfaktoren bestimmt. Hierfür war eine Auswahl der relevanten und geeigneten Parameter notwendig. In Anlehnung an die von KLEPPMANN (1998) vorgestellte Systematik wurden die ermittelten Parameter in eine Tabelle eingetragen und anhand der drei Kriterien *Änderungsmöglichkeit*, *geschätzter Umsetzungsaufwand* sowie *vermuteter Einfluss auf das Versuchsergebnis* hinsichtlich einer verbesserten Prozessführung durch Scanstrategien beim Elektronenstrahlschmelzen bewertet. Der Wert 1 bedeutet in diesem Zusammenhang einen hohen Aufwand bzw. einen geringen vermuteten Einfluss, während der Wert 10 einen geringen Aufwand bzw. einen hohen vermuteten Einfluss repräsentiert. Durch die Multiplikation der Werte wird eine Kennzahl bestimmt, sodass eine Priorisierung hinsichtlich der Relevanz und eine Auswahl der am höchsten bewerteten Parameter durchgeführt werden kann. In Tabelle 10 sind für die aufgeführten Einflussfaktoren die systematische Ermittlung der Bedeutung und die auf der durchgeführten Bewertung basierende Auswahl dargestellt. Anlagen- oder werkstoffbezogene Parameter werden in dieser Tabelle nicht berücksichtigt. Es sollen vor allem, entsprechend der zuvor beschriebenen

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

Zielsetzung, Wechselwirkungen mit den sich aus den Scanmustern ergebenden Effekten untersucht werden.

	Vermuteter Einfluss	Änderungs- möglichkeit	Aufwand/ Kosten	Be- wertung	Rang	Aus- wahl
Elektronenstrahlparameter (informativ aufgeführt)						
Strahlleistung	2	9	8	144	19	
Fokusslage	7	5	6	210	16	
Strahldurchmesser	6	7	6	252	15	
Intensitätsverteilung	9	9	2	162	17	
Strahlcharakteristik	3	6	5	90	22	
Brennweite/Strahltaile	2	7	6	84	23	
Scangeschwindigkeit	6	7	8	336	10	
Anzahl der Fokuspunkte	8	7	8	448	6	
Einprozess (selektives Verfestigen) oder Mehrprozess (z.B. Vorwärmen + selektives Verfestigen)	7	7	8	392	8	
Anzahl der Belichtungen einer Schicht	3	9	6	162	17	
Scanmuster						
<i>Hatch:</i>						
Querschnitt der Bauteilschicht	9	7	2	126	20	
Einteilung des Querschnittes (komplett/Teilbereich)	10	9	7	630	4	
Form (der Teilbereiche)	9	8	9	648	3	X
Reihenfolge (der Teilbereiche)	9	8	5	360	9	
Größe (der Teilbereiche)	9	10	9	810	2	X
Füllmuster	10	10	9	900	1	X
Musterwechsel (in den Teilbereichen)	4	9	9	324	11	
<i>Hatchlinienabstand</i>	8	7	9	504	5	X
Richtungsverlauf der <i>Hatchlinien</i>	7	7	9	441	7	
Outlining:						
Querschnitt der Bauteilschicht	9	7	2	126	20	
Abstand der Linien	5	7	9	315	12	
Richtungsverlauf der <i>Outlininglinien</i>	5	7	9	315	12	
Linienzahl	5	7	9	315	12	

Spalte	Erläuterung
<i>Vermuteter Einfluss</i>	Vermuteter Einfluss des Parameters für eine verbesserte Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen im Rahmen der Untersuchungen; Angabe von 1 (geringer Einfluss) bis 10 (hoher Einfluss)
<i>Änderungs-möglichkeit</i>	Grundsätzliche Möglichkeit, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, mit der die verschiedenen Stufen des Parameters eingestellt werden können; Angabe von 1 (hoher Aufwand) bis 10 (geringer Aufwand)
<i>Aufwand/Kosten</i>	Aufwand, um die zu untersuchenden Stufen des Parameters einzustellen; Angabe von 1 (hoher Aufwand) bis 10 (geringer Aufwand)
<i>Bewertung</i>	Durch die Multiplikation der ersten drei Spalten gebildete Kennzahl; ein höherer Wert gibt eine höhere Relevanz für die weiteren Untersuchungen an.
<i>Rangfolge</i>	Angabe des Ranges des Parameters hinsichtlich der durchgeführten Bewertung; die 5 erfolgversprechendsten sind grau hinterlegt und durch 1 gekennzeichnet.
<i>Auswahl</i>	Auswahl als Versuchsparameter; gekennzeichnet durch X

Tabelle 10: Systematische Auswahl der zu variierenden Elemente eines Scan-musters

Für die weiteren Untersuchungen wurden die Parameter nach ihren Kennzahlen geordnet und die erfolgversprechendsten ausgewählt (grau hinterlegte Felder).

Eine Ausnahme bildet der Parameter *Einteilung der Teilbereiche*, d. h., das Scanmuster wird auf den gesamten oder auf einen in Teilbereiche gegliederten Querschnitt appliziert. Da grundlegende Effekte, wie sie bei der Applizierung verschiedener Scanmuster auftreten, zu bestimmen sind, genügt trotz des vermutet hohen Einflusses die Untersuchung einzelner Füllmuster. Somit sind keine vollständig definierten komplexen Querschnitte erforderlich.

Auf Basis der obigen Tabelle konnten somit die Parameter *Füllmuster*, *Größe* und *Form der Teilbereiche* sowie *Hatchlinienabstand* als wesentliche Merkmale für die Untersuchung der Scanmuster identifiziert werden. Für diese Parameter werden in Tabelle 11 die zugehörigen Ausprägungen definiert. Wesentliche Formen der Teilbereiche sind hier das Hexagon, das Quadrat und der Kreis. Die Ausprägungen der Teilbereiche wurden durch Scanfeldgrößen mit Werten von 2,5 mm bis 25 mm in verschiedenen Abstufungen festgelegt. Unterschiedliche Füllmuster wie z. B. Spiralen, x-Hatches oder Hilbert-Kurven mit Linienabständen von 0,025 mm bis 0,4 mm wurden im Rahmen dieser Untersuchungsreihe appliziert. Um die sich aus der unten stehenden Aufstellung ergebenden 840 möglichen Kombinationen zu beherrschen, wurden in repräsentativ gestalteten Versuchsreihen jeweils ausgewählte Parameter untersucht. Somit konnte mit einer reduzierten Versuchszahl eine Aussage zu den Auswirkungen verschiedener Scanmuster erzielt werden.

Parameter						
Ausprägung	Form		Teilbereichs-/Scanfeldgröße		Füllmuster	Hatchlinienabstand
	<ul style="list-style-type: none"> •Hexagon •Quadrat •Kreis 	x	<ul style="list-style-type: none"> •2,5 mm •5 mm •7,5 mm •10 mm •12,5 mm •15 mm •20 mm •25 mm 	x	<ul style="list-style-type: none"> •Spirale, innen nach außen •Spirale, außen nach innen •äquidist. Konturlinien, innen nach außen •äquidist. Konturlinien, außen nach innen •x-Hatch, 1 Richtung •x-Hatch, 2 Richtungen •Hilbert-Kurve 	<ul style="list-style-type: none"> •0,025 mm •0,05 mm •0,1 mm •0,2 mm •0,4 mm
Anzahl der Teillösungen	3	x	8	x	7	x 5
Anzahl der Gesamtlösungen	= 840					

Tabelle 11: Ausprägungen der ausgewählten Parameter für die Untersuchung des Einflusses des Scanmusters auf das Prozessergebnis

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

In der Versuchsreihe wurden die drei Formen Hexagon, Quadrat und Kreis näher betrachtet. Mit dem Hexagon und dem Quadrat lassen sich Flächen vollständig ausfüllen, sodass bei einer Unterteilung über den gesamten Schichtquerschnitt gleiche Bedingungen geschaffen werden können. Als Vergleich hierzu sollte exemplarisch durch die Auswahl eines Kreises eine Grundform implementiert werden, bei der nur stetige Richtungs- oder kleine Winkeländerungen vorkommen. Als Füllmuster wurden z. B. Spiralen, d. h. das konturparallele Scannen der Linien bei einer konstanten Reduzierung bzw. Erhöhung der Auslenkung vom Zentrum, integriert. Weiterhin besteht die Möglichkeit, äquidistante Konturlinien anzuwenden, welche sich an der äußeren Geometrie der Form orientieren und eine Änderung der Auslenkung nach jedem Umlauf bedingen. Aufgrund des ähnlichen Aufbaus und des ähnlichen Prozessverhaltens wurden diese beiden Optionen innerhalb der Auswertung als gleichwertige Lösungen behandelt. Der *x-Hatch* beschreibt den konventionellen Fall eines zeilenweisen, bidirektionalen Scannens. Einen Sonderfall stellt die Hilbert-Kurve als Füllmuster des Quadrats dar. Durch die geometrische Definition wird die Größe des Musters aus der Ordnung der Kurve und dem *Hatch*linienabstand berechnet. Für die Versuchsdurchführung können sich daher Abweichungen in der applizierten Größe des quadratischen Umrisses ergeben.

4.4.3 Versuchsdurchführung zur Untersuchung unterschiedlicher Scanmuster

Die über die verschiedenen Versuchsreihen applizierten konstanten Prozessparameter mit ihren Ausprägungen sind in Tabelle 12 aufgelistet.

	Parameter	Ausprägung
Pulverwerkstoff	Werkstoff	1.2343
	Korngröße	32 - 63 μm
	Schichtdicke	0,2 mm
Elektronenstrahl	Linsenstrom (Fokus) während des Vorheizens	1450 mA (defokussiert) Abweichung $\Delta I_L = -400$ mA, d. h. die Fokusebene des Elektronenstrahls liegt unterhalb der Bearbeitungsebene
	Strahlleistung beim Vorheizen	Rampe: bis 200 W mit 5 W/s Leistungszunahme bis 1600 W mit 10 W/s Leistungszunahme
	Vorheizfigur	Konzentrische Kreise mit \varnothing 80 mm
	Beschleunigungsspannung U_A	100 kV
	Linsenstrom (Fokus) während der Verfestigung	1850 mA (fokussiert)
	Strahlstrom I_B	1 mA
	Ablenkgeschwindigkeit v	1 m/s

Tabelle 12: Konstante Prozessparameter innerhalb der Versuchsreihen zur Variation verschiedener Scanmuster

Für die Versuchsdurchführung wurden die erforderlichen Figurdateien mit der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Software erzeugt und an die *MiniMod*-Steuerung der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage übertragen. Ein defokussierter Elektronenstrahl heizte sowohl die Grundplatte als auch die daran anschließend aufgetragene Pulverschicht des Werkstoffs 1.2343 bis auf ca. 1000 °C auf. Bei der in mehrere Versuchsreihen untergliederten Versuchsdurchführung wurde jeweils ein zu betrachtender Parameter (z. B. Form und Größe des Teilbereichs, Füllmuster) ausgewählt. Eine Übersicht aller Versuche ist im Anhang dargestellt.

4.4.4 Analyse der durchgeführten Versuche

Für eine systematische Versuchsauswertung müssen zuvor die zu bewertenden Kriterien festgelegt werden. Diese Auswahl soll einen eindeutigen Vergleich der durchgeführten Experimente mit den zugehörigen Parametervariationen ermöglichen. Zur genaueren Abgrenzung werden die Kriterien *Balling*, *Materialanhäufung*, *Homogenität* und *Verbindungsgrad der Hatchlinien* nachstehend beschrieben und es wird eine Skala für die folgenden Bewertungen definiert.

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

- Balling:** Dieser Effekt wird durch die vorherrschende Oberflächenspannung des Schmelzbades verursacht. Eine hohe Oberflächenspannung verursacht eine Oberflächenverringern der Schmelze bis hin zur Ausbildung einer Schmelzkugel (KRUTH ET AL. 2004). Dieser Effekt tritt insbesondere dann auf, wenn das Verhältnis der Schmelzbadlänge l und der Schmelzbadbreite d größer als 2,1 ist ($l/d > 2,1$; siehe Abbildung 65 oben). Die Bewertung in diesem Abschnitt wird anhand einer Skala von 1 bis 10 (vgl. Abbildung 65 unten) vorgenommen, wobei 1 ein starkes Auftreten dieses Effekts und 10 eine glatte (gute) Oberfläche bedeutet.

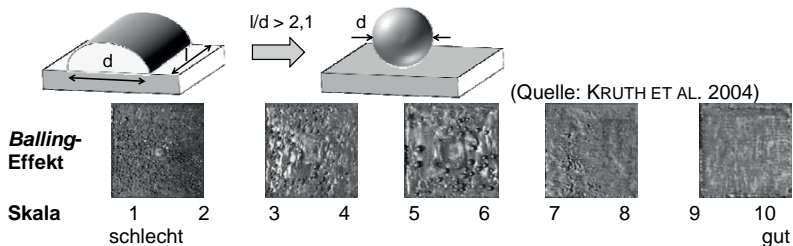


Abbildung 65: Balling: Ursache des Effekts (oben) und Bewertungsskala für die im Rahmen der Schranke 3 - Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität - durchgeführten Versuche

- Homogenität:** Dieses Kriterium beschreibt, ob sich die Oberflächenqualität innerhalb der verfestigten Figur lokal unterscheidet. Die Skala in Abbildung 66 zeigt exemplarisch die zugehörigen Ausprägungen für die jeweilige Bewertungsstufe.

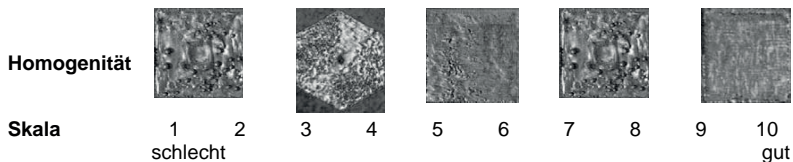


Abbildung 66: Homogenität: Bewertungsskala für die im Rahmen der Schranke 3 - Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität - durchgeführten Versuche

- Werkstoffanhäufung:** Durch die Strahlablenkung werden Materialströmungen im Schmelzbad induziert, sodass flüssiger Werkstoff in Ablenkrichtung von der Vorderseite zur Rückseite des Elektronenstrahlfokus transportiert wird (DANCE 2002). Bei Unstetigkeiten wie bspw. einer Richtungsänderung reißt diese Strömung ab und es bilden sich Werkstoff-

anhäufungen. Die zugehörige Bewertungsskala ist in Abbildung 67 dargestellt.

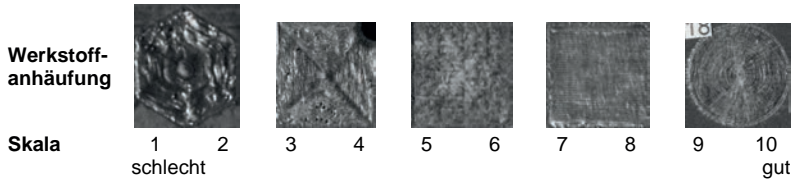


Abbildung 67: *Werkstoffanhäufung: Bewertungsskala für die im Rahmen der Schranke 3 - Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität - durchgeführten Versuche*

- *Verbindungsgrad der Hatchlinien:* Die Verfestigung innerhalb einer Schicht wird u. a. durch die Verbindung nebeneinanderliegender *Hatch*-linien bestimmt. Für ein homogenes Bauteilgefüge ist eine ausreichende Verbindung der *Hatch*linien untereinander essentiell. Abbildung 68 zeigt die zugehörige Bewertungsskala auf.

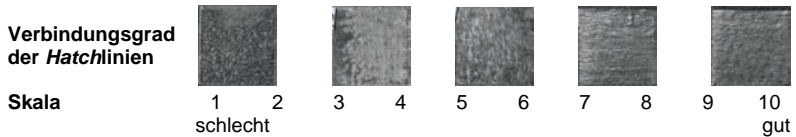







Abbildung 68: *Verbindungsgrad der Hatchlinien: Bewertungsskala für die im Rahmen der Schranke 3 - Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität - durchgeführten Versuche*

Eine hohe Oberflächenqualität bedingt einerseits, dass Effekte des *Ballings* und der Materialanhäufung vermieden und andererseits eine Gleichmäßigkeit und Ebenheit der Oberfläche sichergestellt werden.

Die Bestimmung der Auswirkungen des „*Balling*-Effekts“ wird anhand einer visuellen Bewertung der erzeugten Oberflächen durchgeführt, da eine Messwert-erfassung bspw. durch Oberflächenrauheitsmessgeräte aufgrund der Schmelzkugeln nicht möglich ist. In Abbildung 69 sind die für die untersuchten Formen und die mit den zugehörigen Füllmustern ermittelten Werte eingetragen. Als Vergleichsbasis wurden für diese Tabelle Scanfelder der Größe $b = 10 \text{ mm}$ definiert. Zu berücksichtigen ist, dass für die Hilbert-Kurve die Größe der Form durch den *Hatch*linienabstand und die Ordnung der Kurve bestimmt wird. Als Bewertungsgrundlage wird die in Abbildung 65 definierte Skala für den *Balling*-Effekt von 1 bis 10 genutzt.

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

		Füllmuster		
		äquidistante Konturlinien/ Spirale	x-Hatch	Hilbert-Kurve
Form	Hexagon			
	Bewertung	6		
	Beobachtung	Beginnendes Auftreten des Balling-Effekts		
	Quadrat			
	Bewertung	2	9	10
	Beobachtung	Balling-Effekt tritt über die gesamte Fläche auf	Kein Auftreten des Balling-Effekts	
	Kreis			
	Bewertung	10		
	Beobachtung	Kein Auftreten des Balling-Effekts		

Maßstab: \longleftrightarrow 10 mm

Werkstoff	Elektronenstrahlparameter	Geometrieparameter
<ul style="list-style-type: none"> • 1.2342 bei einer Körnung von 30 - 62 μm • Schichtdicke $t = 0,2 \text{ mm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigungsspannung $U_A = 100 \text{ kV}$ • Strahlstrom $I_B = 1 \text{ mA}$ • Ablenkgeschwindigkeit $v = 1 \text{ m/s}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Hatchlinienabstand $h = 0,1 \text{ mm}$ • Scanfeldgröße $b = 10 \text{ mm}$

Abbildung 69: Grad des Auftretens des Balling-Effekts in Abhängigkeit von Füllmuster und Form (Bewertungsskala siehe Abbildung 65)

Die ermittelten Werte zeigen, dass sowohl die Form als auch das Füllmuster einen wesentlichen Einfluss auf das Auftreten des Balling-Effekts haben. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass für die Erzeugung einer hohen Oberflächengüte entweder geringe Winkeländerungen während des Verfestigens (z. B. Hexagon, Kreis) oder ein lokaler Energieeintrag (z. B. Hilbert-Kurve, x-Hatch) vorteilhaft sind.

Zusätzlich zu diesen Angaben der geometrischen Formen bzw. Füllmuster musste noch die Abhängigkeit des Balling-Effekts von der Größe der Formen bei verschiedenen Füllmustern untersucht werden. In Tabelle 13 ist hierzu der Grad des Auftretens dieses Effekts in Abhängigkeit von den Formen des Quadrats und des Hexagons mit exemplarischen Füllmustern bei verschiedenen Scanfeldgrößen

ßen dargestellt. Aufgrund der hohen Zahl von Einzelwerten wird hier auf eine bildliche Darstellung der Versuchsergebnisse verzichtet.

Form		Quadrat		Hexagon
Füllmuster		x-Hatch	äquidistante Konurlinien/ Spirale	äquidistante Konurlinien/ Spirale
Scanfeldgröße	2,5 mm	10	10	8
	5 mm	10	10	9
	7,5 mm	9	7	7
	10 mm	8	3	6
	12,5 mm	8	2	4
	15 mm	8	2	2
	20 mm	7	1	2
	25 mm	5	1	2

- verstärkt auftretender *Balling*-Effekt
 Grenze für eine signifikante Verringerung der Oberflächenqualität durch das Auftreten des *Balling*-Effekts

Werkstoff

- 1.2342 bei einer Körnung von 30 - 62 μm
- Schichtdicke $t = 0,2 \text{ mm}$

Elektronenstrahlparameter

- Beschleunigungsspannung $U_A = 100 \text{ kV}$
- Strahlstrom $I_B = 1 \text{ mA}$
- Ablenkgeschwindigkeit $v = 1 \text{ m/s}$

Geometrieparameter










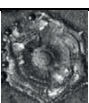
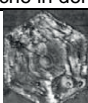
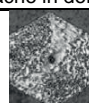
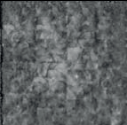
- *Hatch*linienabstand $h = 0,1 \text{ mm}$

Tabelle 13: Grad des Auftretens des Balling-Effekts in Abhängigkeit von der Form, der Größe der Form und exemplarischer Füllmuster (Bewertungsskala vgl. Abbildung 65; Füllmuster vgl. Abbildung 49)

Bei der Auswertung dieser Tabelle ist abzuleiten, dass eine lokale, d. h. in einem Bereich in einem kurzen Zeitraum wiederkehrende Energieeinbringung zu einem geringeren Auftreten des *Balling*-Effekts führt. Wie schon ausgeführt, zeigen die Untersuchungen von KRUTH ET AL. (2004) zu diesem Effekt, dass das geometrische Verhältnis der Schmelzbadlänge zur Schmelzbadbreite nicht über einen bestimmten Wert (für laserstrahlbasierte Verfahren 2,1) ansteigen darf. Durch eine Ablenkung des Elektronenstrahls in der Nähe erst kurz zuvor verfestigter, den Ablenkweg des Fokuspunktes überlappender Bereiche kann eine ausreichende Ausdehnung des Schmelzbades auch quer zur Scanrichtung sichergestellt werden. So werden die benötigten Geometrieverhältnisse, d. h. die Erhöhung der Schmelzbadbreite d , geschaffen. Dies war bei den definierten Prozessparametern bei einem x-*Hatch* bis zu einer Breite der Form von ca. 20 mm der Fall. Bei äquidistanten Ablenkwegen war es möglich, diesen Effekt sowohl bei einem Quadrat als auch bei einem Hexagon ab einer Größe der Form von ca. 10 bzw. 12,5 mm zu beobachten.

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

Die Analyse zur Gleichmäßigkeit der Oberfläche des verfestigten Bereichs kann anhand verschiedener Reihen erfolgen. In Abbildung 70 ist hierzu eine Übersicht verfestigter Oberflächen unterschiedlicher Scanmuster gegeben.

Scanfeld- größe	 5 mm	 10 mm	 20 mm
x-Hatch			
<i>Bewertung</i>	10	9	6
<i>Beobachtung</i>	• Gleichmäßige Fläche	• Gleichmäßige Fläche	• Beginnender Balling-Effekt
Quadrat (äquidistante Konturlinien/ Spirale)			
<i>Bewertung</i>	9	2	1
<i>Beobachtung</i>	• Gleichmäßige Fläche	• Balling-Effekt über gesamte Fläche • Gleichmäßige Fläche in der Mitte	• Balling-Effekt über gesamte Fläche • Gleichmäßige Fläche in der Mitte
Hexagon (Spirale/ äquidistante Konturlinien)			
<i>Bewertung</i>	6	4	2
<i>Beobachtung</i>	• Gleichmäßige Fläche • Balling-Effekt im Randbereich	• Balling-Effekt im Randbereich	• Balling-Effekt über gesamte Fläche • Gleichmäßige Fläche in der Mitte
Hilbert-Kurve			
<i>Bewertung</i>		8	
<i>Beobachtung</i>		• Ablenkwege des Scanmusters werden abgebildet	

Werkstoff	Elektronenstrahlparameter	Geometrieparameter
<ul style="list-style-type: none"> • 1.2342 bei einer Körnung von 30 - 62 μm • Schichtdicke: $t = 0,2 \text{ mm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigungsspannung $U_A = 100 \text{ kV}$ • Strahlstrom $I_B = 1 \text{ mA}$ • Ablenkgeschwindigkeit $v = 1 \text{ m/s}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Hatchlinienabstand $h = 0,1 \text{ mm}$

Abbildung 70: Vergleich der Homogenität verfestigter Oberflächen bei verschiedenen Formen, Größen und Füllmustern von Scanmustern (Bewertungsskala siehe Abbildung 66)

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass, ähnlich dem Auftreten des *Balling*-Effekts, bei den Formen Quadrat und Hexagon mit äquidistanten Konturlinien als Füllmuster die Inhomogenität der Oberfläche bei steigender Größe der Form stark zunimmt. Insbesondere bei der quadratischen Form mit der Kantenlänge 20 mm sind im äußeren Bereich gehäuft Schmelzkügelchen zu beobachten, wobei im Zentrum eine gleichmäßige Oberfläche nachweisbar ist. Der beschriebene Zusammenhang ist bei den dargestellten Hexagonen der Größe 10 mm und 20 mm sowie bei einer quadratischen Form der Größe 10 mm weniger stark ausgeprägt. Bei den Formen mit der Scanfeldgröße 5 mm und bei den quadratischen Formen mit dem *x-Hatch* als Füllmuster konnte eine gleichmäßige Oberfläche mit einem nur geringen Auftreten störender Effekte erzielt werden.

Die hier geschilderten Beobachtungen hinsichtlich einer homogenen Fläche belegen deutlich den Einfluss der Größe und der Art des Scanmusters. Dies kann auch auf die Zeitdauer zwischen dem Energieeintrag des Elektronenstrahls in das metallische Pulver an einer definierten Stelle und dem erneuten Überstreichen eines Bereichs nahe dem zuvor aufgeschmolzenen Bereich durch den Strahlfokus zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 71).

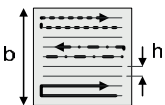
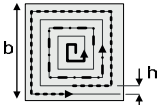
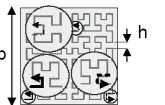
		Scanmuster		
		<i>x-Hatch</i>	Spirale/ äquidist. Konturlinien	Hilbert-Kurve
Scanlänge	Beginn			
	→	Min: h Max. $2 \times b$	$4 \times h$	$3 \times h$
	Mitte	Min: h Max. $2 \times b$	$\approx 4 \times (b/2)$ $= 2 \times b$	$3 \times h$
	Ende	Min: h Max. $2 \times b$	$\approx 4 \times b$	$3 \times h$

Abbildung 71: Vergleich der Scanlängen bei verschiedenen Scanmustern, bis der Strahlfokus erneut den Wirkbereich erreicht (*x-Hatch*, Spirale und Hilbert-Kurve)

Bei einer zu langen Scanlänge und somit einer zu langen Zeitdauer bis zum erneuten Positionieren des Elektronenstrahlfokus in der Nähe des bereits aufgeschmolzenen Bereichs wird über Wärmestrahlung und -leitung zu viel Wärmeenergie abgeführt. Somit reicht die Strahlleistung alleine nicht mehr aus, auch Werkstoff quer zur Scanrichtung aufzuschmelzen, d. h. das Verhältnis der Schmelzbadlänge l und der Schmelzbadbreite d unter dem für einen stabilen

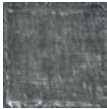

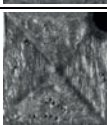
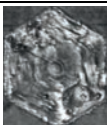
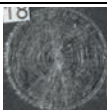
4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

Prozess erforderlichen Wert zu halten. Daher können Effekte wie das *Balling* auftreten. Im Rahmen der Auswahl einer Scanstrategie ist daher eine abgestimmte Parameterdefinition notwendig. Es muss die erforderliche, stabile Schmelzbadgeometrie über die gesamte Fläche sicher gestellt werden. Es ist daher ziel führend, nur eine möglichst konstante Zeitdauer beim Überstreichen des Strahl ablenkweges für jeden Punkt des Querschnittes bis zum erneuten Einwirken der Energiequelle zuzulassen. Die einzustellenden Strahlparameter müssen, angepasst an das jeweilige Scanmuster, eingestellt werden.

Die erläuterte zeitliche Abhängigkeit konnte bei äquidistanten Konturlinien als Füllmuster durch die gleichmäßige Oberfläche im Zentrum bzw. bei vergleichsweise kleinen Abmaßen der Form bestätigt werden. Im Randbereich der größeren Form ist die Zeitdauer zwischen dem erneuten Einwirken des Elektronenstrahls länger, während im Zentrum und bei kleineren Ausmaßen der Form die notwendige Schmelzbadgeometrie sichergestellt werden kann. Der *x-Hatch* hat in diesem Zusammenhang eine über die Form konstante maximale Zeitdifferenz zwischen dem erneuten Erwärmen eines Bereichs bei zwei nebeneinander liegenden *Hatch*linien. Diese wird durch den Zeitraum zum Scannen zweier Linien von einer Umrisslinie des Scanfeldes bis zurück zum Ausgangspunkt (hier $2 \times b$) bestimmt, sodass hier auch bei größeren Abmaßen eine gleichmäßige Oberfläche sichergestellt werden kann. Bei der Applikation einer Spirale bzw. analog äquidistanter Linien als Füllmuster unterscheidet sich die Zeitdauer zum erneuten Erwärmen eines Bereichs im Zentrum der Spirale erheblich von der in der Mitte bzw. am Rand des Scanfeldes. Gegenüber dem Zentrum verlängert sich bei einem Quadrat als Scanfeld der Größe $b = 10\text{mm}$ und dem *Hatch*linienabstand $h = 0,1\text{mm}$ der Spirale die Scanlänge in der Mitte um den Faktor 50 und am Rand um den Faktor 100. Somit kann sich ab einem bestimmten Abstand vom Zentrum keine für einen konstanten Prozess erforderliche Schmelzbadgeometrie mehr ausbilden und der *Balling*-Effekt tritt verstärkt auf. Im Weiteren bestätigen die erzeugten Oberflächen der Experimente, bei denen Hilbert-Kurven als Füllmuster eingesetzt wurden, die geschilderten Zusammenhänge. Durch die Selbstähnlichkeit dieses Musters wird der Elektronenstrahl immer nur sehr begrenzt von dem zu betrachtenden Punkt abgelenkt und kehrt innerhalb sehr kurzer Zeit zurück. Es bildet sich eine konstante Schmelzbadgeometrie mit einer angepassten Längen- und Breitenausdehnung über die gesamte Fläche aus, die negative Prozessausprägungen wie das *Balling* verhindert.

Werkstoffanhäufungen infolge von Effekten, die sich durch die Interaktion der Elektronenstrahlbewegung und des Schmelzbades ergeben, müssen in Abhängigkeit vom Füllmuster und von den Ausprägungen der Form des Teilbereichs be-

trachtet werden. In Abbildung 72 sind die mittels verschiedener Grund- bzw. Füllmuster erzeugten Oberflächen zu sehen.

Form	Füllmuster		Beobachtung	Be- wertung
Quadrat	x-Hatch		Keine Materialanhäufungen über das Scanfeld hinweg	8
	Hilbert-Kurve		Leichte Materialanhäufungen im Bereich der über das Scanfeld verteilten 90°-Richtungsänderungen	6
	äquidistante Konturlinien/ Spirale		Starke Materialanhäufungen an den Stellen der 90°-Richtungsänderungen des Scanmusters (an den Diagonalen des Quadrats)	1
Hexagon			Materialanhäufungen an den Stellen der 60°-Richtungsänderungen des Scanmusters	4
Kreis			Glattes, gleichmäßiges Scanfeld ohne Materialanhäufungen	10

Maßstab



Werkstoff

- 1.2342 bei einer Körnung von 30 - 62 μm
- Schichtdicke $t = 0,2 \text{ mm}$

Elektronenstrahlparameter

- Beschleunigungsspannung $U_A = 100 \text{ kV}$
- Strahlstrom $I_B = 1 \text{ mA}$
- Ablenkgeschwindigkeit $v = 1 \text{ m/s}$

Geometrieparameter

- Hatchlinienabstand $h = 0,1 \text{ mm}$
- Scanfeldgröße $b = 10 \text{ mm}$

Abbildung 72: Durch Schmelzbadströmungen während der Schichtverfestigung verschiedener Grund- und Füllmuster verursachte Werkstoffanhäufung (Bewertungsskala siehe Abbildung 67)

Es ist zu beobachten, dass






- bei sprunghaften, großen Winkeländerungen (Unstetigkeitsstellen) eine Materialanhäufung erkennbar ist (Quadrat, Sechseck mit äquidistanten Linien als Füllmuster);

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

- dieser Effekt bei kleineren Winkeländerungen abnimmt bzw. nicht mehr auftritt (Kreis);
- bei der Applizierung der Hilbert-Kurve als Füllmuster an den Stellen der Winkeländerungen kleine, lokale Materialanhäufungen auftreten;
- dieser Effekt bei einem *x-Hatch* als Scanmuster nicht feststellbar ist.

Die oben erläuterten Zusammenhänge lassen den Schluss zu, dass die Einflüsse des Füllmusters und der aus der jeweiligen Strahlablenkung resultierenden Schmelzbadeffekte für die Erzeugung einer gleichmäßigen und guten Oberfläche berücksichtigt werden müssen. Materialanhäufungen treten insbesondere bei Unstetigkeitsstellen auf, an denen der Elektronenstrahlfokus die Ablenkrichtung wechselt. Bestehende Strömungen im Schmelzbad werden gestoppt, Material hinter dem Elektronenstrahl abgelagert (DANCE 2002) und in der geänderten Ablenkrichtung wird ein neues stationäres Strömungsfeld in der Schmelze etabliert. Der Effekt ist bei großen Winkeländerungen (z. B. 90°) deutlicher feststellbar als bei kleineren (z. B. 60°) Winkeländerungen. Eine sehr kleine bzw. eine konstante Winkeländerung (z. B. Kreis) ermöglicht stabile Schmelzbadverhältnisse, sodass Materialanhäufungen nicht auftreten. Die nur lokal und begrenzt feststellbaren Ausprägungen bei der Hilbert-Kurve beruhen darauf, dass dieser Effekt zwar auftritt, dass aber zum einen aufgrund der begrenzten Scanvektorenlängen (*Hatch*linienabstand = Scanvektorenlänge) nur geringe Materialmengen abgelagert werden können und diese zum anderen durch den Überlappbereich des Strahlfokus teilweise wieder aufgeschmolzen und damit egalisiert werden. Beim *x-Hatch* lassen sich diese Materialablagerungen nicht feststellen, da es im Feld zu keiner Winkeländerung kommt. Nur an den Umkehrstellen wird die Ablenkrichtung invertiert.

Die Schichtverfestigung kann zudem durch den Verbindungsgrad der *Hatch*-linien untereinander in Abhängigkeit des *Hatch*linienabstandes bewertet werden (vgl. Abbildung 73).

Hatch- linienab- stand	 0,4 mm	 0,2 mm	 0,1mm	 0,05 mm	 0,025 mm
Maßstab	↔ 15mm				
Bewertung	2	4	6	8	10
Beobach- tung	Hatchlinien deutlich getrennt sichtbar	Hatchlinien sichtbar	Homogen verfestigte Fläche, Hatchlinien sichtbar	Homogen verfestigte Fläche	Homogen verfestigte Fläche

Werkstoff

- 1.2342 bei einer Körnung von 30 - 62 μm
- Schichtdicke:
 $t = 0,2 \text{ mm}$

Elektronenstrahlparameter

- Beschleunigungsspannung
 $U_A = 100 \text{ kV}$
- Strahlstrom $I_B = 1 \text{ mA}$
- Ablenkgeschwindigkeit $v = 1 \text{ m/s}$

Geometrieparameter

- Scanfeld: Quadrat
- Scanfeldgröße
 $b = 15 \text{ mm}$
- Füllmuster: x-Hatch

Abbildung 73: Verbindungsgrad der Hatchlinien zur Herstellung einer homogen verfestigten Oberfläche (Bewertungsskala siehe Abbildung 68)

Für die Bauteilherstellung ist eine homogen verfestigte Fläche mit einer ausreichenden Verbindung der Hatchlinien erforderlich. Aus der Übersicht wird deutlich, dass bei den aufgeführten Prozessparametern mit einem Hatchlinienabstand von maximal 0,1 mm die erforderliche Verbindung zwischen den Hatchlinien erreicht werden kann.

4.4.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigten die durchgeführten Untersuchungen, dass verschiedenste durch das Scanmuster bestimmte Einflussfaktoren während des Verfestigens der Pulverschicht das Versuchsergebnis hinsichtlich der auftretenden Effekte beeinflussen. Tabelle 14 stellt eine Übersicht der aus den Versuchen ermittelten Parametereinflüsse auf das Prozessergebnis zur Verfügung. Auf der Basis dieser Tabelle werden anschließend die verschiedenen Untersuchungsaspekte nochmals bewertet bzw. es werden Empfehlungen für den praktischen Einsatz zur Auswahl von Scanmustern abgeleitet.

4.4 Schranke 3: Einfluss von Scanmustern auf die Bauteilqualität

Parameter / Element eines Scanmusters	Ermittelter Einfluss des Parameters auf das Prozessergebnis	Ursache
Größe der Teilbereiche (Scanfeldgröße)	<ul style="list-style-type: none"> • Homogenität • <i>Balling</i>-Effekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Zu große bzw. variable Zeitdifferenzen zwischen dem ersten und dem erneuten Erwärmen eines Bereichs bei zwei nebeneinanderliegenden <i>Hatch</i>linien
Füllmuster	<ul style="list-style-type: none"> • Werkstoffanhäufung • <i>Balling</i>-Effekt • Homogenität 	<ul style="list-style-type: none"> • (Zu große) Winkeländerungen • Zu große bzw. variable Zeitdifferenzen zwischen dem erneuten Erwärmen eines Bereichs bei zwei nebeneinanderliegenden <i>Hatch</i>linien
<i>Hatch</i>linienabstand	<ul style="list-style-type: none"> • Verbindungsgrad zwischen einzelnen Scanlinien 	<ul style="list-style-type: none"> • Energie des Strahlfokus reicht nicht aus, um bereits verfestigte <i>Hatch</i>linien erneut aufzuschmelzen;
Form der Teilbereiche	<ul style="list-style-type: none"> • Kann auftretende Effekte während der Schichtverfestigung verstärken 	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmt die Größe der Winkeländerung bzw. hat einen Einfluss auf die Zeitdifferenz;

Tabelle 14: Einflüsse auf das Prozessergebnis und deren Ursache bei den untersuchten Elementen eines Scanmusters

Auf der Basis von Tabelle 14 lassen sich für die untersuchten Elemente, wie Größe der Teilbereiche, Füllmuster, *Hatch*linienabstand und Form der Teilbereiche, folgende Bewertungen erstellen bzw. Handlungsweisen für den Einsatz bei Scanmustern ableiten. Dabei wird deutlich, dass vor allem das prozesssichere Erzeugen und Beibehalten eines stabilen Schmelzbades im Elektronenstrahlfokus das Auftreten unerwünschter Effekte verhindert:

- *Form der Teilbereiche*: Für die Form des Teilbereiches ist eine regelmäßige Geometrie zu definieren, welche ein vollständiges Überdecken des Querschnittes ermöglicht. Zusätzlich schränkt das gewählte Füllmuster die Auswahl der Form des Teilbereiches ein. Für eine Hilbert-Kurve ist z. B. nur eine quadratische Grundform möglich, während für äquidistante Konturlinien oder Spiralen auch Hexagone möglich sind.
- *Größe der Teilbereiche*: Die maximal mögliche Größe eines Teilbereichs wird durch das ausgewählte Füllmuster bestimmt. Die Zeitdifferenz zwischen dem ersten und dem erneuten Erwärmen eines Bereichs bei zwei

nebeneinanderliegenden *Hatch*linien darf einen spezifischen Wert für den jeweiligen Werkstoff und für die geplante Geometrie nicht überschreiten.

- *Füllmuster*: Die Definition des Füllmusters muss so erfolgen, dass der beschriebene Elektronenstrahlablenkweg die konstante und prozesssichere Ausbildung des Schmelzbades mit einem ausreichenden Verhältnis von Länge zu Breite über die gesamte Fläche sicherstellt. Unstetige Richtungsänderungen sind zu vermeiden bzw. zu minimieren.
- *Hatchlinienabstand*: Ein zu großer *Hatch*linienabstand verhindert die prozesssichere Verbindung mehrerer *Hatch*linien zu einer homogenen Fläche.

Wesentlich für die Beeinflussung der Zielgrößen wie Oberflächenqualität (hier: Vermeiden des *Balling*-Effekts und von Materialanhäufungen) und Homogenität der Oberfläche ist, wie bei der Auswertung zu sehen, dass konstante Schmelzbadeigenschaften über die Verfestigung des jeweiligen Bereichs hinweg erreicht werden. In Tabelle 15 findet sich hierzu eine Übersicht der wichtigsten Zusammenhänge. Auch wird daraus deutlich, dass die Form des Teilbereichs *Hexagon* und das Füllmuster *Spirale* für die Formen *Hexagon* und *Quadrat* im Rahmen dieser Untersuchungen nur ein geringes Potenzial für die Optimierung der Zielgrößen beim Elektronenstrahlschmelzen bergen. Diese werden daher für diese Arbeit nicht mehr weiter betrachtet.

Zielgröße	Schranke 3: Einfluss von Scanmustern											
	Scannmuster											
		Unterteilung in Teilbereiche										
			Form der Teilbereiche									
				Quadrat	Hexagon	Kreis						
	Größe der Teilbereiche											
	Füllmuster											
	x-Hatch											
	Spirale (für Form des Teilbereichs Kreis)											
	Spirale/ konzentrische Konturlinien (für Form des Teilbereichs Hexagon und Quadrat)											
	Fass-Kurven (z. B. Hilbert-Kurve)											
Hatchabstand												
Hohe Oberflächengüte (Vermeiden des <i>Balling</i> -Effektes)	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Hohe Oberflächengüte (Vermeiden von Materialanhäufungen)	x	x	x	x	x		x	x	x			
Homogenität der selektiv verfestigten Fläche	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	
Verbindungsgrad von <i>Hatch</i> linien												x

X - Eine Erhöhung des Erfüllungsgrades der Zielgrößen durch Optimierung hinsichtlich des ausgewählten Parameters möglich.

Tabelle 15: Zusammenfassende Übersicht des Einflusses auf Zielgrößen von in diesem Abschnitt untersuchten Scanstrategien der Schranke 3

4.5 Schranke 4: Optimierung der Schichtqualität durch angepasste Strahlparameter

4.5.1 Allgemeines

Die Oberflächengüte einer Schicht bestimmt das spätere visuelle Erscheinen des Bauteils und beeinflusst die Verfestigung weiterer Schichten. Außerdem muss eine ausreichende Verbindung der aktuell gefertigten Schicht zu den bereits bestehenden Schichten hergestellt werden. Für die folgenden Untersuchungen wurde daher zunächst die Abhängigkeit der Oberflächengüte von der Fokusslage und der Energiedichte bei einem konstanten Scanmuster (Abschnitt 4.5.2) bestimmt. Weiterhin sind der Einfluss u. a. der Energiedichte auf die Porenbildung (Abschnitt 4.5.3) und die erreichbare Schichtverbindung (Abschnitt 4.5.4) Bestandteil der Untersuchungen. In Abschnitt 4.5.5 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

4.5.2 Oberflächengüte

Bei elektronenstrahlbasierten Fertigungsverfahren übt die Fokusslage einen signifikanten Einfluss auf die Strömungen im Schmelzbad aus. Diese bestimmen bei Elektronenstrahlschweißverfahren sowohl die Einschweißtiefe als auch die Qualität der Nahtoberfläche. Das höchste Schweißnahttiefe-Schweißnahtbreite-Verhältnis für Bleche kann durch eine Fokusslage von ca. 0,15-mal der Blechdicke unterhalb der Blechoberfläche erreicht werden (SCHILLER ET AL. 1977). Durch eine angepasste Strahlform soll daher beim Elektronenstrahlschmelzen einerseits eine homogene Oberfläche und andererseits eine scharfe Abgrenzung zwischen verfestigtem und nicht verfestigtem Material zur Optimierung von seitlichen Flächen erzielt werden. Exemplarisch wurde dies an einer sich verjüngenden Spirale mit einem *Hatch*linienabstand von 0,1 mm untersucht. Die Einstellung der Fokusslage erfolgte entweder fokussiert oder defokussiert unterhalb der Pulveroberfläche mit ca. 2 % Abweichung des Linsenstromes (vgl. Abbildung 74).

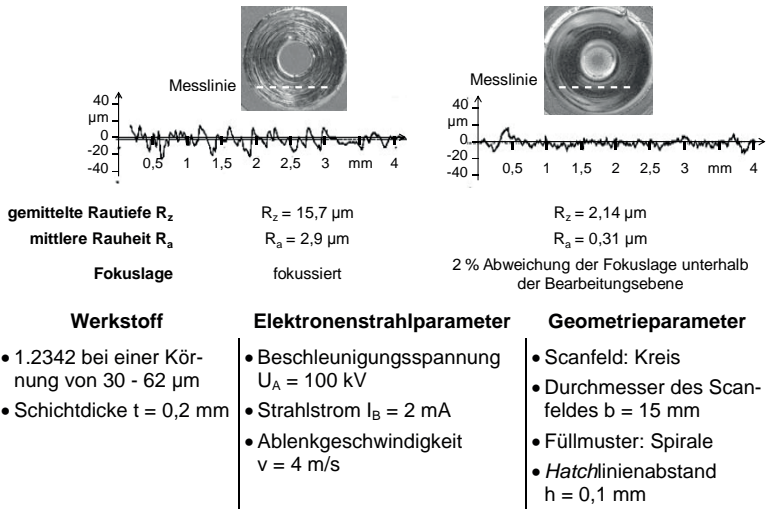


Abbildung 74: Oberflächenrauheit und gemittelte Rautiefe in Abhängigkeit von der Fokusslage

In der links abgebildeten Messung ist eine Probe dargestellt, die mit einem auf die Schichtoberfläche fokussierten Elektronenstrahl hergestellt wurde. Diese besitzt hohe Werte der Rautiefe ($R_z = 15,7 \mu\text{m}$) und der Mittenrauwerthe ($R_a = 2,9 \mu\text{m}$). Bei dieser Messung sind die Spitzen der spiralförmigen Scanmuster deutlich zu erkennen. Der Abstand zweier Spitzen entspricht der Spiralsteigung. Der Rand der Probe ist hier gegenüber dem Metallpulver deutlich abgegrenzt. Im Gegensatz dazu zeigt die im rechten Bild dargestellte Probe mit 2 % Abweichung der Fokusslage unterhalb der Bearbeitungsebene während der Verfestigung eine verglichen mit der linken Probe deutlich geringere Oberflächenrauheit ($R_z = 2,14 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,31 \mu\text{m}$). Durch die veränderte Fokusslage und den somit breiteren Strahlquerschnitt wurden die Spitzen zwischen den Spiralsteigungen geglättet. Jedoch ist nur eine unscharfe Berandung der Probe zu erkennen. Dieser Vergleich verdeutlicht, welchen grundsätzlichen Einfluss die Strahlkonfiguration auf das Verfestigungsergebnis besitzt. In den Außenbereichen der jeweiligen Kontur wird eine feine Auflösung des Strahlquerschnitts, d. h. ein fokussierter Elektronenstrahl, zur Erzeugung einer definierten Kante für das *Outlining* benötigt. Hingegen erzielt in den *Hatch*bereichen des Bauteils ein defokussierter Elektronenstrahl Oberflächen mit einer geringen Rauheit.

4.5 Schranke 4: Optimierung der Schichtqualität durch angepasste Strahlparameter

Neben der singulären Betrachtung einzelner Parameter wie z. B. der Strahlleistung ist deren Einfluss auf die Oberflächengüte in Zusammenhang mit weiteren Faktoren zu sehen. Beispielsweise können mithilfe der Energiedichte (ED) (J/mm^3), d. h. der nach dem Vorheizen eingebrachten Elektronenstrahlenergie pro Volumen, gebildet aus den Parametern Strahlleistung (P), Ablenkgeschwindigkeit (v), Schichtdicke (t) und *Hatch*linienabstand (h), die Auswirkungen des Energieeintrags weiter beschrieben werden (KRUTH ET AL. 2005A):

$$ED = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (4)$$

Einen Einfluss hat dieser Wert u. a. auf die Oberflächengüte. Hierfür wurden die bei den Untersuchungen erzeugten Oberflächen visuell in einer Skala (1 [schlecht] bis 10 [gut]) bewertet. Diese visuelle Gewichtung fand statt, da z. B. bei Bauteilen mit der Gewichtung 2 aufgrund von Poren und Materialanhäufungen der Taster des Oberflächenrauheitsmessgeräts hängen bleiben und beschädigt werden kann. In einem solchen Fall ist kein Erfassen von Rauheitswerten möglich. Das in Abbildung 75 dargestellte Diagramm zeigt, dass für das metallische Pulver der Legierung 1.2343 eine Energiedichte zwischen 1 J/mm^3 und $2,5 \text{ J/mm}^3$ zusätzlich zur Vorheizenergie nötig ist, um ein Bauteil mit guten Oberflächeneigenschaften herzustellen. Als Probengeometrie wurde ein Quadrat der Kantenlänge $b = 12 \text{ mm}$ festgelegt. Wird die Energiedichte auf einen Wert von über $2,5 \text{ J/mm}^3$ eingestellt, nimmt die maximal erreichbare Oberflächenqualität kontinuierlich ab. Die im Diagramm dargestellte Linie repräsentiert die maximale Oberflächenqualität, die für die jeweilige Energiedichte möglich ist. Ursächlich für die abnehmende Oberflächengüte bei höheren Energiedichten als $2,5 \text{ J/mm}^3$ ist das erhöhte Auftreten von Poren.

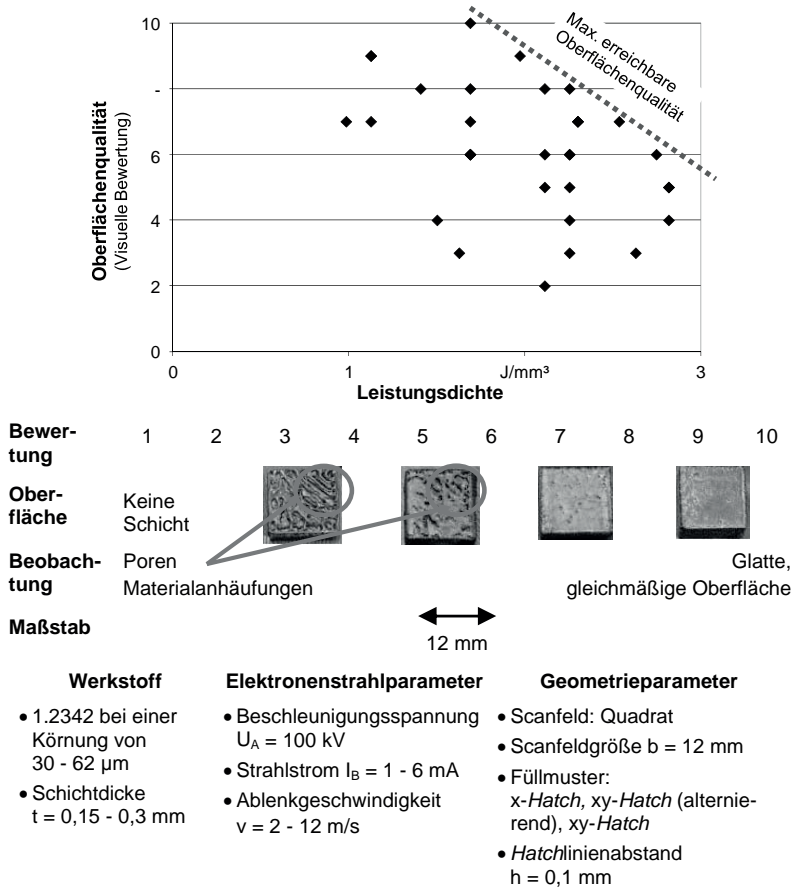


Abbildung 75: Abhängigkeit der Oberflächenqualität von der Energiedichte

4.5.3 Porenbildung

Die Abhängigkeit des Auftretens von Poren von der Energiedichte ließ sich im Rahmen der Arbeit durch eine optische Beobachtung der Schichtverfestigung ebenfalls nachweisen. In Abbildung 76 ist eine mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommene Übersicht des zeitlichen Verlaufs einer Energieeinbringung zu sehen.

4.5 Schranke 4: Optimierung der Schichtqualität durch angepasste Strahlparameter

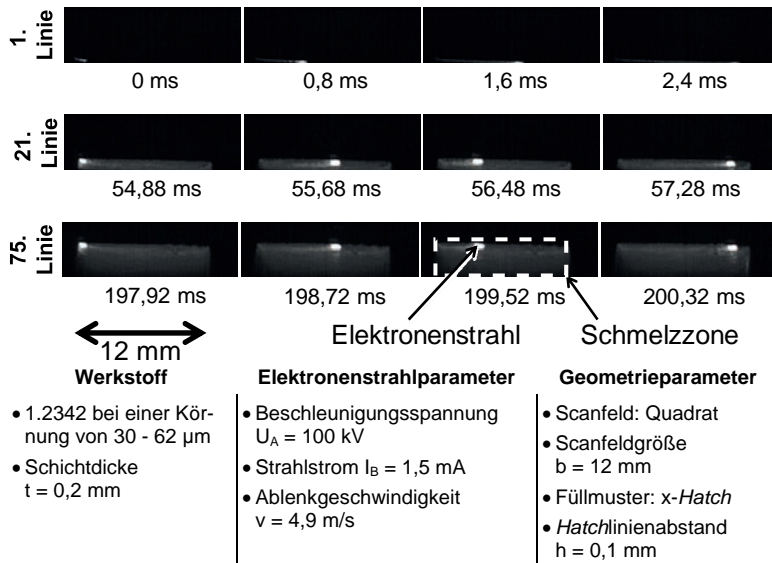


Abbildung 76: Bilderfolge einer Schichtverfestigung ($ED = 1,55 \text{ J/mm}^3$)

Das quadratische Scanmuster mit x-Hatches (Kantenlänge 12 mm) wurde mit einer Energiedichte von ca. $1,55 \text{ J/mm}^3$ zusätzlich zur eingebrachten Vorheizenergie verfestigt. Als Parameter waren eine Pulverschicht (hier: Werkstoff 1.2342; Kornfraktion 32 - 63 μm , Schichtdicke $t = 0,2 \text{ mm}$) und der Elektronenstrahl (hier: Strahlstrom $I_B = 1,5 \text{ mA}$, Hatchlinienabstand $h = 0,1 \text{ mm}$ und Ablenkgeschwindigkeit $v = 4,9 \text{ m/s}$) einzustellen. Bei den Aufnahmen ist der Ablauf des selektiven Aufschmelzens einer Schicht zu sehen. Zu Beginn ist während des Überstreichens der ersten Spur an der Fokusposition des Elektronenstrahls der unmittelbare Schmelzbereich erkennbar. Das Aufschmelzen fand nur dort statt. Es ist keine Ausdehnung der Schmelzzone außerhalb des Fokuspunktes zu beobachten. In den weiteren Spuren ist der Fokuspunkt deutlicher sichtbar, da sich die Spuren teilweise überlappen und daher ein breiteres Schmelzbad auftrat. Auch lässt sich aus den Bildern der Spuren 21 und 75 ableiten, dass aufgrund der spezifischen Pulvereigenschaften, z. B. geringe Wärmeleitfähigkeit des Metallpulvers gegenüber dem Festkörper (GUSAROV ET AL. 2003), die Wärmeenergie in dem eng begrenzten Schmelzbereich des Quadrats verbleibt.

Die Bilderfolge in Abbildung 77 hingegen zeigt das Einbringen einer Energiedichte von $2,91 \text{ J/mm}^3$ zusätzlich zur Vorheizenergie.

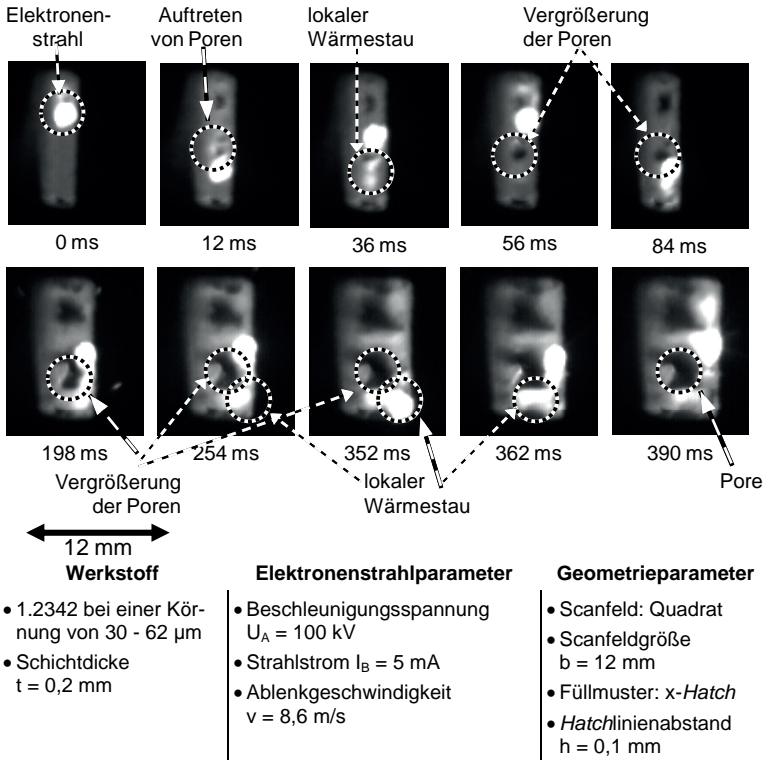


Abbildung 77: Bilderfolge einer Schichtverfestigung (Energiedichte: $2,91 \text{ J/mm}^3$)

Die gegenüber der in Abbildung 76 dargestellten Bilderfolge höhere Energiedichte führte zu einem größeren Bereich aufgeschmolzenen Werkstoffs. Aufgrund der Oberflächenspannung hat die Schmelze die Tendenz, ihre Oberfläche zu verkleinern und sich somit zusammenzuziehen. Dies verursachte im Laufe der Energieeintringung mittels des Elektronenstrahls einen lokalen Wärmestau, der sich in der Folge vergrößerte. Dies ist gleichbedeutend mit einer Steigerung der Inhomogenität in der Energieverteilung und einer weiteren Materialanhäufung an dieser Stelle. In den Bereichen mit einer hohen gespeicherten Wärmeenergie sammelt sich somit der flüssige Werkstoff und es entstehen Gebiete in der jeweiligen Schicht, bei denen entweder kein oder zu viel Werkstoff vorhanden ist. Erstarrt diese Schicht, so ist eine gesicherte Schichtverbindung für die darauf folgende Schicht in den Bereichen mit einer fehlenden Unterlage nicht mehr gewährleistet. Fehlstellen in einer verfestigten Werkstoffschicht zusammen mit

4.5 Schranke 4: Optimierung der Schichtqualität durch angepasste Strahlparameter

einer ungenügenden Schichtverbindung führen im Regelfall somit zu Poren im Bauteil. Daneben beeinträchtigt ein solcher Effekt nicht nur das visuelle Erscheinungsbild und die erreichbare Gefügedichte, sondern es können beim Zusammenziehen des flüssigen Werkstoffs zudem Erhöhungen entstehen, an denen der Rakelmechanismus beim anschließenden Pulverauftrag hängen bleibt, sodass der Bauprozess abgebrochen werden muss.

4.5.4 Schichtverbindung

Die Qualität der Verbindung mehrerer Schichten kann für die Beurteilung der Bauteile als ein Merkmal herangezogen werden. Diese wird durch die in der Energiedichte zusammengefassten Elektronenstrahlparameter maßgeblich beeinflusst. In Abbildung 78 ist der Grad der Schichtverbindung in Abhängigkeit von der eingebrachten Energiedichte und des Scanmusters dargestellt. Die Schichtverbindung wird dimensionslos mit den Werten 1 (schlecht) bis 10 (gut) bewertet. Das Diagramm verdeutlicht, dass eine erhöhte Energiedichte die Schichtverbindung verbessert. Dies ist vor allem auf eine dabei ausreichende Strahleindringtiefe mit dem hierdurch bedingten erneuten Aufschmelzen der darunterliegenden Schichten zurückzuführen.

Zusätzlich zu den Elektronenstrahlparametern muss der Einfluss des jeweiligen Scanmusters beachtet werden. Durch die Wahl der drei unterschiedlichen Muster mit parallelen Linien konnten die Auswirkungen unterschiedlicher Linienverläufe demonstriert werden. Die Ausführung der parallelen Linien des *Hatch*musters erfolgte uni- und bidirektional, alternierend wie auch bidirektional in einer Schicht. Es ist zu erkennen, dass vor allem beim unidirektionalen Scannen über mehrere Schichten die Verzüge zu einer Verformung der Schicht und somit zu einer unzureichenden Schichtverbindung führen. Diese Verzüge verursachten, dass sich die jeweilige Schicht nur begrenzt mit der darunterliegenden verband und sich während des Verfestigens der Metallschmelze die Ränder leicht nach oben bogen. Hierdurch entstanden die mit in der Bewertung 3 bis 5 hinterlegten Ergebnisse. Durch den Wechsel der Scanrichtung konnte ein homogener Energieeintrag realisiert werden, der entstehenden Verzügen entgegenwirkt (Bewertung 6 bis 7 bzw. 8 bis 10). Insbesondere das bidirektionale Scannen innerhalb einer Schicht verhinderte durch das zweimalige, um 90° versetzte Scannen der Pulverschicht bereits während der Verfestigung ein Aufbiegen der jeweiligen Schicht.

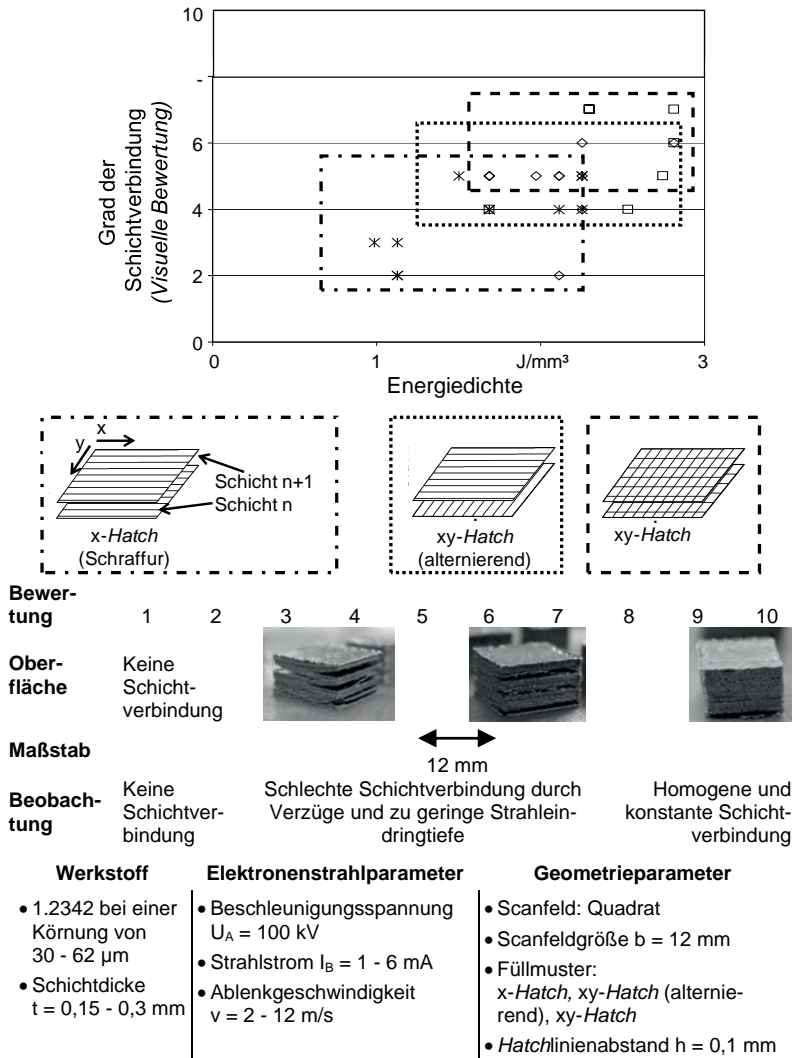


Abbildung 78: Einfluss der Scanstrategie und der Energiedichte auf den Grad der Schichtverbindung

Diese Betrachtung verdeutlicht, dass für die Verfestigung einer Schicht primär eine ausreichende Energiedichte durch die Wahl entsprechender Strahlparameter eingestellt werden muss, um gesichert die jeweiligen Bauteilschichten unterei-

4.5 Schranke 4: Optimierung der Schichtqualität durch angepasste Strahlparameter

inander zu verbinden. Eine entsprechende Definition von Scanmustern unterstützt dies u. a. durch das Verringern von Verzügen innerhalb einer Schicht.

4.5.5 Zusammenfassung

Die beschriebenen Zusammenhänge hinsichtlich des Einflusses der Elektronenstrahlparameter zeigen, dass die Zielgrößen durch unterschiedliche Aspekte beeinflusst werden. Als ein Haupteinflussfaktor konnte die Energiedichte der zusätzlich zur Vorheizenergie eingebrachten Strahlleistung bestimmt werden. Einerseits begrenzt eine hohe Energiemenge pro Volumeneinheit die Oberflächenqualität und bedingt eine verstärkte Porenbildung. Andererseits ist dabei eine verbesserte Verbindung der einzelnen Schichten erreichbar. Ferner ist es möglich, die Oberflächenqualität zusätzlich durch die Fokusslage und die Schichtverbindung durch die Wahl eines adäquaten Scanmusters zu optimieren. Diese Zusammenstellung veranschaulicht, dass Wechselwirkungen für die Parameterauswahl einer angepassten Scanstrategie zu berücksichtigen sind. Im Rahmen der systematischen Vorgehensweise zur Bestimmung einer Scanstrategie bedeutet dies, dass in der Auswahlmatrix insbesondere Strahlparameter, aber auch die jeweiligen Scanmuster unter Berücksichtigung möglicher Wechselwirkungen ausgewählt werden müssen. In Tabelle 16 sind in einer Matrix betrachtete Scanstrategieelemente und Zielgrößen einander gegenübergestellt.

Schranke 4:
Optimierung der
Schichtqualität

Zielgröße	Strahlparameter					Scanmuster					Hatchabstand
	Leistung	Ablenkgeschwindigkeit	Energiedichte	Fokusslage		Füllmuster	x-Hatch	xy-Hatch	xy-Hatch (alternierend)		
Porenbildung	x	x	x	x							x
Schichtverbindung	x	x	x	x		x	x	x			x
Oberflächengüte	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x

X - Eine Erhöhung des Erfüllungsgrades der Zielgrößen durch Optimierung hinsichtlich des ausgewählten Parameters möglich.

Tabelle 16: Zusammenfassende Übersicht des Einflusses auf Zielgrößen von im Rahmen dieser Schranke 4 untersuchten Scanstrategien

4.6 Zusammenfassung

Der in diesem Kapitel beschriebene Einfluss verschiedener Scanmuster und der Energieeinbringung beim Elektronenstrahlschmelzen unterstreicht die Bedeutung der Scanstrategien für die generative Fertigung mit dem Elektronenstrahl. Auch konnte so im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Eignung einer kommerziellen Elektronenstrahl-Universalkammeranlage zum selektiven Verfestigen pulverförmiger Werkstoffe nachgewiesen werden. Durch die beschriebenen Eigenschaften ergeben sich vielfältige Potenziale für den Einsatz des Elektronenstrahls zur schichtweisen Bauteilherstellung. Für eine Integration in die Bauteilfertigung müssen die Scanstrategien und Strahlparameter an die jeweilige Aufgabe angepasst werden. Dabei lassen sich grundlegende Zusammenhänge ableiten. Mit deren Kenntniss ist es möglich, eine Fertigung hinsichtlich der vom Anwender definierten Zielgrößen zu optimieren. Es ist u. a. zu beachten, dass

- durch das Unterteilen des Bauteilquerschnitts in zu verfestigende Teilbereiche konstante Umgebungsbedingungen für das Elektronenstrahlschmelzen erzielt werden;
- durch eine an bereits verfestigte Bereiche angepasste Strahlleistung eine homogenere Verfestigung erreicht werden kann;
- eine überproportional hohe Strahlleistung bei einer höheren Ablenkgeschwindigkeit notwendig ist;
- durch angepasste Scanmuster eine gleich bleibende Verfestigung erzielt werden kann;
- für die Teilbereiche angepasste Größen und Scanmuster definiert werden können;
- eine hohe Oberflächengüte und ein stabiler Verfestigungsprozess durch eine angepasste Auswahl der Scanmuster erreicht werden können;
- eine abgestimmte Fokuslage des Elektronenstrahls zur Glättung der Aufschmelzlinien führt;
- durch eine angepasste Energiedichte das Auftreten von Poren minimiert wird;
- durch definiert variierende Scanrichtungen die Schichtverbindung verbessert wird und Verzüge in einer Schicht vermieden werden.

Zur systematischen Auswahl von Scanstrategien beim Elektronenstrahlschmelzen können die oben aufgeführten Erkenntnisse im Rahmen der in Abschnitt 3.2.7.3 vorgestellten Entscheidungsmatrix zur Festlegung der verschiedenen Strahlparameter bzw. der Ausprägungen des Scanmusters genutzt werden. Tabel-

4.6 Zusammenfassung

le 17 zeigt beispielhaft den Zusammenhang für ausgewählte Bauteileigenschaften und Parameter der Scanstrategie. Aus Übersichtlichkeitsgründen sind hier ausschließlich die direkten in den vorigen Abschnitten erläuterten Abhängigkeiten dargestellt. Eine Markierung bedeutet, dass die jeweilige Ausprägung der Scanstrategie einen positiven Einfluss auf die zu erzeugende Bauteileigenschaft hat. Wegen der vielfältigen und jeweils spezifischen Anforderungen der jeweiligen Bauteile beinhaltet diese Übersicht keine Anforderungsgewichtung. Sie stellt lediglich einen Ausschnitt möglicher Bewertungskriterien für das Elektronenstrahlschmelzen dar. Auch muss sie an die jeweilige Aufgabe angepasst und für die Übertragung auf weitere generative Fertigungssysteme ergänzt bzw. reduziert werden.

Zielgröße	Zusammenfassung																		
	Strahlparameter				Unterteilung in Teilbereiche														
	Leistung	Ablenkschwindigkeit	Energiedichte	Fokallänge	Scannmuster			Füllreihenfolge			Größe der Teilbereiche			Form der Teilbereiche			Füllmuster		
Eigenspannungen					x	x	x	x	x	x							x	x	x
Dichte	x	x	x	x	x			x	x								x	x	
Oberflächengüte (allg.)	x	x	x	x	x	x					x						x	x	x
Hohe Oberflächengüte (Vermeiden des Balling-Effektes)					x	x					x	x	x	x	x		x		
Hohe Oberflächengüte (Vermeiden von Materialanhäufungen)					x	x					x	x	x	x	x		x		
Homogenität der selektiv verfestigten Fläche					x	x					x	x	x	x	x		x		
Verbindungsgrad von Hatchlinien	x	x	x	x															x
Porenbildung	x	x	x	x	x														x
Schichtverbindung	x	x	x	x	x												x		x

X - Eine Erhöhung des Erfüllungsgrades der Zielgrößen durch Optimierung hinsichtlich des ausgewählten Parameters möglich.

Tabelle 17: Ermittelter Einfluss verschiedener Ausprägungen von Scanstrategien auf das Verfestigungsverhalten

5 Auswahl und Umsetzung von Scanstrategien

5.1 Allgemeines

Die in Kapitel 3 erarbeitete Methodik und die in Kapitel 4 ermittelten Eigenschaften verschiedener Scanstrategien beim Elektronenstrahlschmelzen bildeten die Basis für deren exemplarische Umsetzung anhand einer Beispielgeometrie, was im vorliegenden Kapitel erläutert wird. Zielsetzung war die Herstellung eines Bauteils aus dem Stahlwerkstoff 1.2343 (Körnung 32 - 63 μm) mit einer komplexen Außenstruktur und im Schichtquerschnitt vorhandenen Aussparungen. Es sollte eine homogene, hochwertige Oberfläche bei einer gleichzeitig guten Schichtverbindung (Schichtdicke 0,2 mm) erreicht werden. Abbildung 79 zeigt das Vorgehen mit dem Aufbringen einer Scanstrategie nach der Bauteildefinition und der Verfestigung mit dem Elektronenstrahl zur Bauteilherstellung.

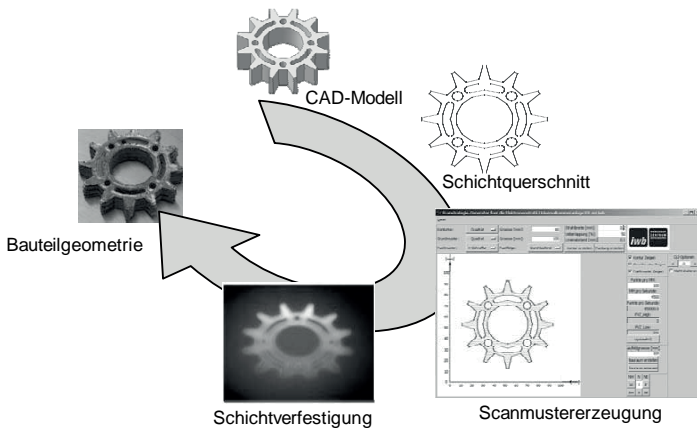


Abbildung 79: Prozessfolge des Anwendungsbeispiels: CAD-Modell – Schichtquerschnitt – Scanmustererzeugung – Schichtverfestigung (Elektronenstrahlschmelzen) – Bauteilgeometrie

Anhand der vor allem in Kapitel 3 beschriebenen potenziellen Lösungsräume wurden zunächst gemäß Abschnitt 5.2 mögliche Scanstrategien ermittelt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Herstellung des Bauteils mit dem Fertigungsverfahren Elektronenstrahlschmelzen in einer Matrix gewichtet, bewertet und ausgewählt. Hierbei waren im Besonderen die in Abschnitt 3.2.7.3 vorgestellten Schritte zur Bewertung und Auswahl der jeweiligen Scanstrategie zu berücksich-

tigen. In Abschnitt 5.2.1 werden hierzu die ermittelten und in die Bewertungsmatrix eingetragenen Anforderungen an das Bauteil sowie die in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage einsetzbaren Scanmuster erläutert. Für die Bauteilanforderungen erfolgte basierend auf dieser Auswahl gemäß Abschnitt 5.2.2 die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren. Anhand dieser Gewichtungsfaktoren wurde entsprechend Abschnitt 5.2.3 eine gewichtete Bewertung der Scanstrategien vorgenommen. Mit den ausgewählten Scanstrategien wurde ein Bauteil in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage gefertigt (Abschnitt 5.3).

Neben der technologischen Betrachtung wird in Abschnitt 5.4 zur ganzheitlichen Bewertung der Ergebnisse eine Einordnung hinsichtlich verschiedener wirtschaftlicher bzw. prozessbedingter Aspekte vorgenommen. Durch das Berücksichtigen wirtschaftlicher Kennwerte und das Antizipieren von Auswirkungen weiterer Entwicklungen kann eine Einordnung des aktuellen und zukünftigen Einsatzes des Elektronenstrahlschmelzens für die generative Bauteilherstellung erfolgen.

5.2 Auswahl und Definition einer Scanstrategie

5.2.1 Mögliche Scanstrategien in der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

Die Beurteilung der Potenziale der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage sowie der Eignung verschiedener Scanstrategien für die Bauteilfertigung mittels des Elektronenstrahlschmelzens erfolgte exemplarisch für die Füllmuster und die Elektronenstrahlparameter. Die verschiedenen Ausprägungen des Füllmusters als ein Hauptmerkmal der Scanmuster wurden ausgewählt, da hier aufgrund der Bauteilgeometrie eine zusätzliche Unterteilung in Teilbereiche keine wesentlichen Vorteile im Fertigungsprozess einbringt. Die bewerteten Füllmuster umfassten u. a. den *x-* bzw. *xy-Hatch*, Spiralen, äquidistante Linien und die Hilbert-Kurve. Auch ließ sich die Scanrichtung entweder einheitlich oder wechselnd definieren.

Im Weiteren war für eine übergreifende Bewertung von Scanstrategien eine Betrachtung der Elektronenstrahlparameter unerlässlich. Entscheidend waren hierbei die Elektronenstrahlleistung, die Ablenkgeschwindigkeit, die Energiedichte, der *Hatch*linienabstand und die Fokusslage. Durch die gewichtete Auswahl konnten vorab die für eine Prozessoptimierung vielversprechendsten Parameter bestimmt werden. In Tabelle 18 ist eine Zusammenfassung der zu bewertenden Elemente und Parameter einer Scanstrategie aufgeführt.

Zu bewertende Elemente und Parameter einer Scanstrategie			
Scanmuster			Elektronenstrahlparameter
Füllmuster	Muster	x-Hatch	Elektronenstrahlleistung
		xy-Hatch (bidirektional)	Ablenkgeschwindigkeit
		xy-Hatch (alternierend)	Energiedichte
		Spirale	Fokuslage
		äquidistante Linien	Hatchlinienabstand
		Hilbert-Kurve	
	Scan- richtung	Einheitlich	
		Wechsel	

Tabelle 18: Im Rahmen der Umsetzung einer Scanstrategie zu bewertende Elemente und Parameter

5.2.2 Bestimmung der Zielgrößen mit ihren Gewichtungsfaktoren

Wie in diesem Kapitel einleitend beschrieben, war eine homogene, hochwertige Oberfläche bei einer gleichzeitig guten Schichtverbindung eine wesentliche Anforderung an das Bauteil. Daneben waren noch die Sicherstellung eines möglichst geringen Eintrags von Eigenspannungen, eine ausreichende Dichte und das Verhindern von Poren zu berücksichtigen. Für die Umsetzung musste zusätzlich, als ein separater Aspekt, die Anwendbarkeit der zu bewertenden Scanstrategien auf den Bauteilquerschnitt geprüft werden.

In Abbildung 80 sind in einer Tabelle die Anforderungen aufgeführt und mittels eines paarweisen Vergleichs bewertet dargestellt. Dieses Vorgehen bietet für den Anwendungsfall die Möglichkeit, eine systematische Gewichtung der Zielgrößen zu erhalten. Hierzu wurden diese zunächst aufgelistet, ihre Relevanz paarweise verglichen und die nach Auffassung des Autors für den Anwendungsfall relevantere Größe bestimmt. Die ermittelten Ergebnisse aller durchgeführten Vergleiche der Anforderungen wurden in einer Matrix eingetragen. Wie in der Übersicht gezeigt, bedeutet dies z. B., dass die Oberflächengüte (Nr. 5) wichtiger ist als die Dichte (Nr. 2) und somit die Zahl 5 eingetragen wird. Abschließend konnte durch die Ermittlung der Häufigkeit der Nennung der jeweiligen Zielgröße auf die relative Häufigkeit und damit die Gewichtung geschlossen werden. Insgesamt bietet dieses Vorgehen einen Weg, um schnell und unabhängig eine Gewichtung zu erhalten.

5.2 Auswahl und Definition einer Scanstrategie

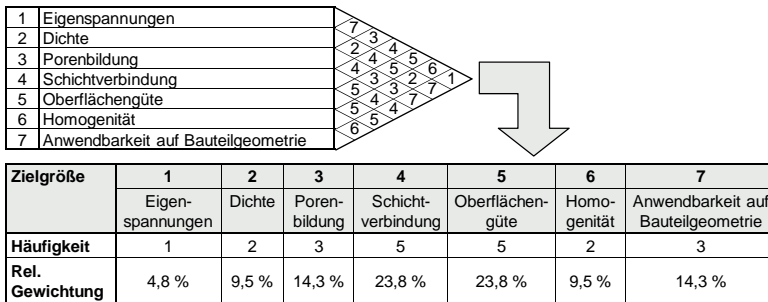


Abbildung 80: Bestimmung der Gewichtungsfaktoren durch einen paarweisen Vergleich

Für das gewählte Beispiel bedeutet dies, dass insbesondere die Schichtverbindung und die Oberflächengüte mit der relativen Gewichtung von 23,8 % zu berücksichtigen waren. Weiterhin stellten die Porenbildung und die Anwendbarkeit der Scanstrategie (rel. Gewichtung 14,3 %) für die Bauteilherstellung bedeutende Zielgrößen dar. Die Homogenität, die Dichte (rel. Gewichtung 9,5 %) und möglichst geringe Eigenspannungen (rel. Gewichtung 4,8 %) waren gegenüber den weiteren Anforderungen als untergeordnet zu sehen.

5.2.3 Bewertung und Auswahl möglicher Scanstrategien

Die Bewertung der ausgewählten Parameter bzw. der daraus ableitbaren Scanstrategien erfolgte in diesem Abschnitt auf der Basis der im vorangegangenen Abschnitt ermittelten Zielgrößen und deren Gewichtungsfaktoren. Der Erfüllungsgrad der jeweiligen Zielgröße (0 [die Zielgröße wird nicht erfüllt/ist nicht möglich] bis 10 [die Zielgröße wird voll erfüllt]) wird in die Matrix eingetragen. Hierbei sind insbesondere für eine allgemeine Übersicht die dort aufgeführte Schranke 1 mit einer Analyse verschiedener veröffentlichter Ergebnisse (vgl. Abschnitt 4.2) bzw. die Schranke 3 mit dem untersuchten Einfluss der Scanmuster (vgl. Abschnitt 4.4) und die Schranke 4 hinsichtlich der Bestimmung des Einflusses der Strahlparameter auf das Prozessergebnis (vgl. Abschnitt 4.5) zu nennen. Die abschließende Ermittlung der Gesamtnote fand durch die gewichtete Summierung der Noten unter Berücksichtigung der ermittelten Faktoren statt.

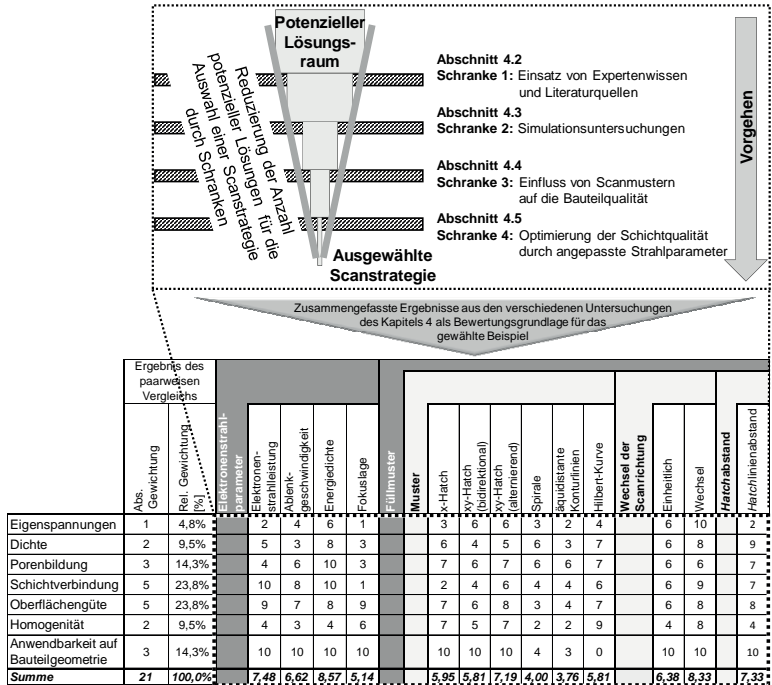


Abbildung 81: Bewertete Scanstrategien auf der Basis der in Kapitel 4 durchgeführten Untersuchungen

In der auf der Basis der Ergebnisse aus den Prozessuntersuchungen durchgeführten Bewertung ist ersichtlich, dass für eine Definition des Füllmusters bzw. als Scanmuster die verschiedenen Ausprägungen des zeilenförmigen x-Hatches mit x-Hatch, xy-Hatch und xy-Hatch (alternierend) zu berücksichtigen waren. Diese boten sowohl das Potenzial, die gewünschten Zielgrößen, wie z. B. eine hohe Oberflächengüte, prozesssicher zu erreichen als auch die Möglichkeit, sie für die gewählte Bauteilgeometrie einzusetzen. Aufgrund der höchsten Bewertung wurde für die Untersuchungen der xy-Hatch (alternierend) ausgewählt. Die weiteren Füllmuster als Formen des Hatches hatten eine deutlich geringere Bewertung bzw. sind nicht oder nur sehr schlecht auf den Schichtquerschnitt adaptierbar.

Auch zeigt die Übersicht, dass in Ergänzung zu dem ausgewählten Scanmuster durch eine angepasste Auswahl der Prozessparameter des Elektronenstrahlschmelzens eine Qualitätssteigerung erreicht werden kann. Insbesondere sind die Elektronenstrahlleistung, die Ablenkgeschwindigkeit, der Hatchlinienabstand

5.3 Herstellung eines Demonstratorbauteils

und die resultierende Energiedichte zu nennen. Für die weiteren Untersuchungen wurden daher diese Parameter ebenfalls berücksichtigt. Dabei wurde ihr Einfluss auf die gewählten Zielgrößen bestimmt und so die für die Bearbeitungsaufgabe ideale Kombination abgeleitet.

5.3 Herstellung eines Demonstratorbauteils

Für die Herstellung des beschriebenen Demonstratorbauteils mittels des Elektronenstrahlschmelzens wurde die im vorangegangenen Abschnitt als am besten geeignet ermittelte Scanstrategie umgesetzt. Das hier im Besonderen betrachtete Füllmuster bestand aus einem schichtweise alternierenden *xy-Hatch* und wird für die folgenden Untersuchungen nicht variiert. Um eine Vergleichbarkeit der Versuche sicherzustellen, wurde der Stahl 1.2343 mit einer konstanten Schichtdicke von jeweils 0,2 mm verwendet. Auch wurde immer die gleiche Vorheizenergie in die jeweilige Schicht eingebracht (keine Variation der Vorheizfigur, der Strahlleistung und des Linsenstroms während des Vorheizens). Tabelle 19 fasst die beschriebenen und über die Versuchsreihe konstanten Parameter nochmals zusammen.

	Parameter	Ausprägung
Pulverwerkstoff	Werkstoff	1.2343
	Korngröße	32 - 63 μm
	Schichtdicke	0,2 mm
Elektronenstrahlparameter	Beschleunigungsspannung	100 kV
	Linsenstrom (Fokus) während des Vorheizens	1450 mA (defokussiert) Abweichung $\Delta I_L = -400$ mA, d. h. die Fokusebene des Elektronenstrahls liegt unterhalb der Bearbeitungsebene
	Strahlleistung beim Vorheizen	Rampe: bis 200 W mit 5 W/s Leistungszunahme bis 1600 W mit 10 W/s Leistungszunahme
	Vorheizfigur	Konzentrische Kreise mit \varnothing 80 mm
	Linsenstrom (Fokus) während des Verfestigens	1850 mA (fokussiert)
Geometrieparameter	Füllmuster	xy-Hatch

Tabelle 19: Konstante Parameter während der Untersuchungsreihe

Die oben ausgewählten Parameter bildeten eine Basis für die Untersuchung verschiedener Strahlkonfigurationen. Für weitere Untersuchungen und Verbesserungen der Bauteilqualität wurden die Parameter *Hatchlinienabstand*, Ablenkgeschwindigkeit und Elektronenstrahlleistung innerhalb definierter Grenzen variiert. Die gewonnenen Erfahrungen belegten, dass erfolgversprechende Parameter für den *Hatchlinienabstand* im Bereich von 0,02 bis 0,10 mm, für die Ablenkgeschwindigkeit im Bereich von 3,3 bis 25,0 m/s und für die Strahlleistung im Bereich von 120 bis 550 W liegen. Die sich hieraus ergebenden Energiedichten betragen ca. 2,2 bis 4,0 J/mm³ für das Metallpulver zusätzlich zur Vorheizenergie. In Tabelle 20 werden die Grenzen des untersuchten Parameterfeldes dargestellt.

	Parameter	Ausprägung
Elektronenstrahlparameter	Ablenkgeschwindigkeit	3,3 - 25,0 m/s
	Strahlleistung	120 - 550 W
	Energiedichte	2,2 - 4,0 J/mm ³
Geometrieparameter	<i>Hatchlinienabstand</i>	0,02 - 0,10 mm

Tabelle 20: Untersuchtes Parameterfeld im Rahmen der Versuchsdurchführung

Eine Bewertung der hergestellten Bauteile erfolgte anhand visueller Kriterien (1 [schlecht] bis 10 [gut]) hinsichtlich der Größen *Schichtzusammenhalt* und *Oberflächengüte*. Diese Größen wurden den Prozessparametern Ablenkgeschwindigkeit, Strahlleistung und *Hatchlinienabstand* grafisch gegenübergestellt. Den jeweiligen Diagrammen sind beispielhafte Aufnahmen von Oberflächen bzw. der Bauteilseite aus repräsentativen Versuchen zur exemplarischen Darstellung der jeweiligen Güte beigefügt.

Das für die Bewertung am einfachsten auszuwertende Kriterium ist die *Oberflächenqualität*. Hierzu ist in Abbildung 82 die jeweils erzielte *Oberflächenqualität* in Abhängigkeit der Ablenkgeschwindigkeit und des *Hatchlinienabstandes* eingetragen. Diese Übersicht zeigt, dass mit einem zunehmenden *Hatchlinienabstand* keine ausreichende Oberflächenqualität mehr erzeugt werden konnte (Bereich A im Diagramm). Durch die Wahl eines entsprechenden *Hatchlinienabstands* gelang es, wie in den Bereichen B und C markiert, eine hohe Oberflächenqualität zu erreichen.

5.3 Herstellung eines Demonstratorbauteils

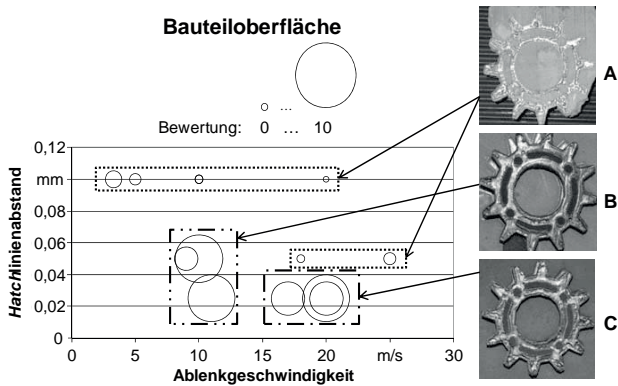


Abbildung 82: Oberflächenqualität des Demonstratorbauteils in Abhängigkeit von Ablenkgeschwindigkeit und Hatchlinienabstand

In Abbildung 83 ist der Zusammenhang zwischen der Elektronenstrahlleistung und der Ablenkgeschwindigkeit dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass die Elektronenstrahlleistung für die hier untersuchte Konfiguration einen Wert von ca. 250 W nicht überschreiten bzw. eine Ablenkgeschwindigkeit von 8 m/s nicht unterschreiten darf (Bereich A in Abbildung 83). Die Bereiche B und C zeigen demgegenüber die Parameterkombinationen, die zu einer hohen Bewertung der Oberflächengüte führen.

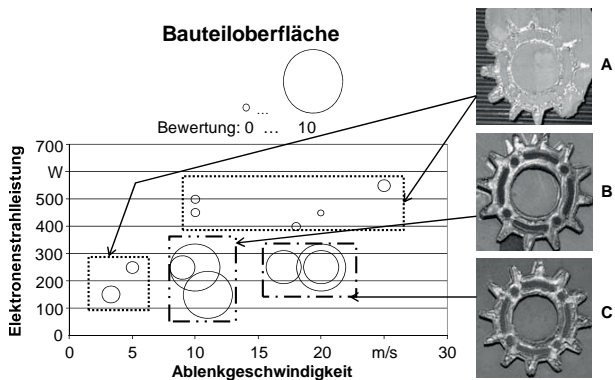


Abbildung 83: Oberflächenqualität des Demonstratorbauteils in Abhängigkeit von Ablenkgeschwindigkeit und Elektronenstrahlleistung

Der *Schichtzusammenhalt* als ein weiteres Merkmal ist in Abbildung 84 aufgeführt. Im Gegensatz zum Kriterium *Oberflächenqualität* war bei der Auswertung des Schichtzusammenhalts hinsichtlich der Einflussgrößen *Hatchlinienabstand* und Ablenkgeschwindigkeit keine Abhängigkeit zu erkennen.

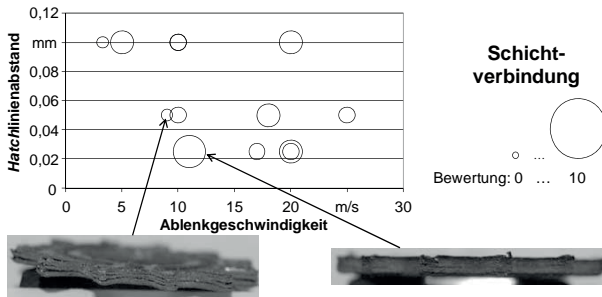


Abbildung 84: Schichtzusammenhalt des Demonstratorbauteils in Abhängigkeit von Ablenkgeschwindigkeit und Hatchlinienabstand

In der Auswertung des *Schichtzusammenhalts* in Abhängigkeit der Ablenkgeschwindigkeit und der Elektronenstrahlleistung in Abbildung 85 wird deutlich, dass mit zunehmender Ablenkgeschwindigkeit auch eine höhere Elektronenstrahlleistung erforderlich war.

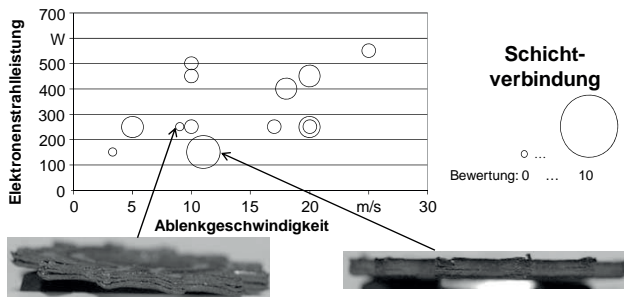


Abbildung 85: Schichtzusammenhalt des Demonstratorbauteils in Abhängigkeit von Ablenkgeschwindigkeit und Elektronenstrahlleistung

Aus diesen Diagrammen kann geschlossen werden, dass für das jeweilige definierte Scanmuster zusätzlich eine sorgfältige Wahl der Elektronenstrahlparameter notwendig ist. Für das gewählte Beispiel verbesserte sich bei der Stahlsorte

1.2343 und einer Schichtdicke von 0,2 mm die *Oberflächenqualität* mit einer Elektronenstrahlleistung kleiner 400 W. Ein ähnlicher Effekt war bei einem *Hatchlinienabstand* kleiner 0,05 mm zu beobachten. Mit diesen Einstellungen liegt der Bereich der Ablenkgeschwindigkeit, bei welchem hohe *Oberflächenqualitäten* erzeugt werden, bei ca. 10 bis 20 m/s. Für eine ausreichende *Schichtverbindung* musste mit zunehmender Ablenkgeschwindigkeit die Elektronenstrahlleistung gesteigert werden. Mit einer angepassten Wahl der dargestellten Parameter (*Hatchlinienabstand*, Elektronenstrahlleistung, Ablenkgeschwindigkeit) ließen sich für den untersuchten Bereich die Schichten verbinden. Bei der gleichzeitigen Betrachtung beider Kriterien (*Oberflächenqualität* und *Schichtzusammenhalt*) ist zu sehen, dass eine hohe Bewertung beider Aspekte bei einer Ablenkgeschwindigkeit von ca. 11 m/s, einer Strahlleistung von ca. 150 W und einem *Hatchlinienabstand* von 0,025 mm erzielt werden konnte.

Diese Betrachtungen machen deutlich, dass der gewählte Bauteilquerschnitt in einer metallischen Pulverschicht durch die Ablenkung eines fokussierten Elektronenstrahls verfestigbar war. Das wiederholte selektive Aufschmelzen des Werkstoffs erzeugte, wie in den Diagrammen dargestellt, in der jeweiligen Schicht eine Oberfläche hoher Qualität und verband die Schichten miteinander zu 3-dimensionalen Werkstücken. Hierbei konnten die Eigenschaften der Elektronenstrahlablenkung genutzt werden, um im Vergleich zu laserstrahlbasierten generativen Fertigungsverfahren höhere Prozessgeschwindigkeiten zu erreichen.

Auch demonstriert das hier dargestellte übergreifende Vorgehen, dass für eine Fertigungsaufgabe durch eine systematische Auswahl das jeweils am besten geeignete Scanmuster für das Elektronenstrahlschmelzen bestimmt werden kann. Ebenso konnten für das gewählte Scanmuster Zielgrößen, wie z. B. die Oberflächengüte oder der Schichtzusammenhalt durch die Anpassung von Prozess- bzw. Elektronenstrahlparametern optimiert und somit eine Scanstrategie definiert werden. Hierdurch ließ sich eine Anwendbarkeit für das generative Fertigungsverfahren Elektronenstrahlschmelzen nachweisen, indem eine bauteilspezifische Auswahl und Definition von Scanstrategien, inkl. der darin implizit enthaltenen Scanmustern sowie Prozessparameter sowie eine darauf basierende Fertigung eines Bauteils erfolgte.

5.4 Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens

Um basierend auf den technologischen Eigenschaften eine ganzheitliche Bewertung des Elektronenstrahlschmelzprozesses zu ermöglichen, sind, wie in Abbildung 86 gezeigt, auch wirtschaftliche bzw. anwendungsbezogene Aspekte zu

berücksichtigen. Diese spiegeln aktuelle wie auch zukünftige Potenziale zum Einsatz des Verfahrens in der generativen Fertigung wider, die sich im Vergleich mit der laserstrahlbasierten selektiven Verfestigung ergeben.

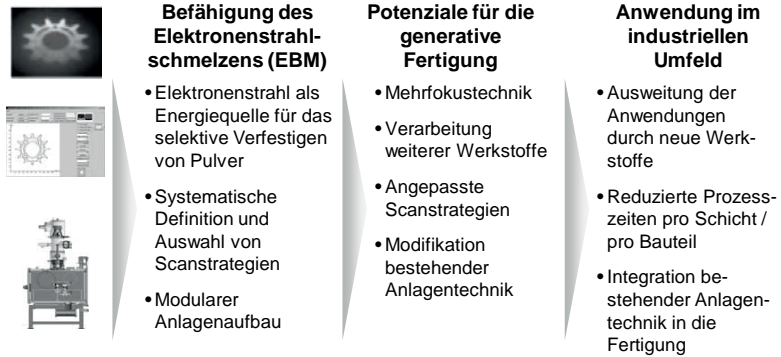


Abbildung 86: Nutzbare Potenziale des Elektronenstrahlschmelzens

Als wesentliche Inhalte dieser Arbeit konnten verschiedene Zielsetzungen erreicht werden. Dies schließt zum einen die Qualifikation des in einer für das Elektronenstrahlschweißen ausgelegten Anlage erzeugten Elektronenstrahls als Energiequelle für das selektive Verfestigen ein. Hierbei gelang es durch eine Modularisierung des Anlagensystems, eine Anpassung der beinhaltenden Steuerung sowie die Integration eines Auftragsmechanismus zu erreichen. Zum anderen ist es durch die dargelegte Vorgehensweise zur Definition und Auswahl von Scanstrategien möglich, anwendungsspezifische Scanstrategien zu definieren, auszuwählen und umzusetzen.

Diese Ergebnisse erlauben es, die sich hierdurch ergebenden Potenziale für die generative Fertigung umzusetzen. Aus werkstofftechnischer Sicht bietet der Elektronenstrahl das Potenzial, neben bereits in der generativen Fertigung eingesetzten Werkstoffen auch hochreaktive Werkstoffe (z. B. Titan) oder hochschmelzende Werkstoffe (z. B. Wolfram) in einer Vakuumkammer prozesssicher zu verarbeiten. Zudem ermöglicht die Elektronenstrahlablenkung mittels elektromagnetischer Spulen Scanstrategien, die an den jeweiligen Schichtquerschnitt angepasst sind. Oftmals beinhalteten diese auch komplexe Ablenkwege. Aufgrund der Ablenkeigenschaften des Elektronenstrahls kann dies prozesssicher auch bei den erforderlichen hohen Ablenkgeschwindigkeiten umgesetzt werden. Im Weiteren kann durch die schnelle Ablenkung das Potenzial erschlossen wer-

den, den Elektronenstahl in mehrere unabhängige Fokuspunkte aufzusplitten und damit die sogenannte Mehrfokustechnik zu realisieren. Durch diese Elektronenstrahlkonfiguration ergeben sich Vorteile gegenüber einem singulären Fokuspunkt, denn ein simultanes Verfestigen verschiedener Querschnittsbereiche oder ein gleichzeitiges Durchführen verschiedener Prozessschritte wie Vorheizen und Verfestigen ist damit möglich. Daraus ergeben sich Vorteile in Bezug auf thermische Verzüge des Werkstückes. Darüber hinaus besteht durch den modularen Aufbau des vorgestellten Fertigungssystems die Option, bestehende Elektronenstrahlschweißanlagen hinsichtlich einer generativen Fertigung zu modifizieren.

Somit kann durch die Umsetzung neuer, angepasster Scanstrategien bzw. durch die Implementierung der Mehrfokustechnik eine Reduktion der Prozesszeit erreicht werden. Folglich lässt sich aus dem verbesserten und verkürzten Prozessablauf indirekt ein Kostenvorteil ableiten. Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methodik zur systematischen Ermittlung neuer und angepasster Scanstrategien stellt hierfür ein wertvolles Hilfsmittel dar. Die weiteren erläuterten Potenziale der Nutzung des Elektronenstrahls zum selektiven Verfestigen pulverförmiger Werkstoffe belegen, dass vor allem mittelbar monetäre Vorteile erzielbar sind. Dabei weist die Vergrößerung des Spektrums verarbeitbarer pulverförmiger Werkstoffe den Weg auf, den Einsatzbereich für generativ gefertigte Bauteile auszudehnen. Zudem können, wie im Rahmen dieser Arbeit dargelegt, bestehende Elektronenstrahl-Universalkammeranlagen durch die Adaption existierender bzw. den Einbau weiterer Module so modifiziert werden, dass eine schichtweise Fertigung möglich ist. Durch die Gesamtheit der erläuterten Potenziale können somit neue Anwendungsgebiete für die generative Fertigung metallischer Bauteile im Allgemeinen sowie das Elektronenstrahlschmelzen im Speziellen erschlossen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Aus dem Trend hin zu kundenindividuellen Produkten, Kleinserien und kürzeren Produktentwicklungszyklen leiten sich für die produzierende Industrie neue Herausforderungen ab. Bisher eingesetzte konventionelle Fertigungsverfahren erfüllen nur begrenzt die sich daraus ergebenden Bedarfe. Insbesondere der Aufwand, den die oftmals kundenspezifischen und komplexen Einzelteile benötigen, erschwert bzw. verhindert oft eine wirtschaftliche Produktion. Generative Fertigungsverfahren, die ein Bauteil schichtweise aufbauen und in der jeweiligen Schicht den Querschnitt selektiv verfestigen, zeigen den aktuell am potenzialträchtigsten Weg auf, um diese Restriktionen zu überwinden. Im Weiteren ermöglichen diese Verfahren auch die Fertigung komplexer, konventionell nicht herstellbarer Geometriemerkmale, wie bspw. konturangepasster Kühlkanäle in Formeinsätzen für den Spritzguss. Laserstrahlbasierte Anlagen für die selektive Verfestigung pulverförmiger Werkstoffe werden für die verschiedensten Anwendungen, sowohl mit Kunststoffen als auch mit Metallen als Ausgangswerkstoff, bereits heute erfolgreich kommerziell eingesetzt.

In der durchgeführten Situationsanalyse wurde ermittelt, dass dabei jedoch vor allem für metallische Werkstoffe noch Restriktionen hinsichtlich des Einsatzes verschiedenster Metalle, der Implementierung angepasster Scanstrategien und der Adaption von kommerziellen Serienanlagen bestehen. Es erwies sich, dass der Elektronenstrahl als Energiequelle einen Schritt hin zur Überwindung dieser Restriktionen und somit hin zum Einsatz von generativen Fertigungsverfahren in einer Serienumgebung darstellt. Ziel dieser Arbeit war es, eine Methode zur Identifikation, Beschreibung, Bewertung und Umsetzung von Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen zu entwickeln. Im Weiteren sollte diese in einer für generative Fertigungsverfahren zu modifizierenden Elektronenstrahl-Universalkammeranlage umgesetzt werden. Dabei bildete der Stand der Forschung und Technik eine Ausgangsbasis sowohl für die Modifikation der Anlagentechnologie als auch für die Methode zur Identifikation, Beschreibung, Bewertung und Umsetzung von Scanstrategien. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend genutzt, um anhand von Prozessuntersuchungen die Potenziale der elektronenstrahlbasierten Fertigung nachzuweisen.

Die Anlagenmodifikation umfasste zunächst eine Analyse des mechanischen Aufbaus und der vorhandenen Steuerungssysteme. Der modulare Aufbau wurde

so konzipiert, dass sowohl die Universalkammeranlage mit einem Pulverauftragsmechanismus schnell umgerüstet als auch Scanmuster durch die Elektronenstrahlableitung abgefahren werden können. Bei der Definition von Scanstrategien wurden für die folgenden Untersuchungen zunächst die Begriffe *Scanstrategie*, *Scanmuster* und *Strahlparameter* erläutert. Zudem fand eine Sammlung und Bewertung potenzieller Scanstrategien für eine Anwendung beim Elektronenstrahlschmelzen statt, sodass eine Methodik zu deren Beschreibung erarbeitet werden konnte. Diese Methodik ermöglicht die Kombination einer Vielzahl unterschiedlicher Scanstrategien wie auch eine einfache Erweiterung um neue Elemente. Um den potenziell großen Lösungsraum zu beherrschen, wurde ein sequentielles Vorgehen in Form von Auswahlsschranken beschrieben, welches eine systematische Eingrenzung des Lösungsraums zulässt.

Die Methode zur Scanmusterbeschreibung liegt dem entwickelten Softwaretool zugrunde, welches an die Datenschnittstelle angepasste Dateien für den Import in die Elektronenstrahl-Universalkammeranlage bereitstellt. Damit lassen sich benutzerspezifische Geometrien einlesen und die zugehörigen Scanmuster erstellen. Diese wurden in den NC-gesteuerten Fertigungsablauf der Anlagensteuerung integriert. In einem weiteren Schritt wurden für vier Auswahlsschranken beispielhafte Untersuchungen vorgestellt. Diese beinhalten ein Vorgehen von einer groben Vorauswahl von möglichen Scanstrategien bis hin zur Optimierung einzelner Aspekte bzw. Parameter in einer Scanstrategie. Eine Anwendung bestehenden Expertenwissens wurde als ein erster Schritt erläutert. Weitere Untersuchungsgegenstände waren die begleitende Simulation des Temperaturfeldes, der Prozesseinfluss von Scanmustern und die Verbesserung von Oberfläche und Schichtzusammenhalt. Die erzielten Erkenntnisse dienten für die Fertigung des erstellten Demonstratorbauteils als Eingangsinformationen, um für dieses eine an die Randbedingungen angepasste Scanstrategie mit Scanmuster und zugehörigen Elektronenstrahlparametern auszuwählen.

Mithilfe des entwickelten Vorgehens konnte hierdurch sowohl die Eignung von nicht spezialisierten Elektronenstrahl-Universalkammeranlagen für die generative Fertigung nachgewiesen als auch ein systematisches Vorgehen zur Erzeugung und Auswahl von Scanstrategien definiert werden. Im Weiteren ließen sich die Eigenschaften des Elektronenstrahls zur Herstellung von Bauteilen nutzen. Das Elektronenstrahlschmelzen stellt daher ein Fertigungsverfahren dar, das zukünftig in verschiedensten Anwendungsgebieten für die wirtschaftliche und hochwertige Produktion von Einzelteilen und Kleinserien z. B. in der Medizintechnik, im Werkzeug- und Vorrichtungsbau, in der Luft- und Raumfahrt oder im Prototypenbau effizient eingesetzt werden kann.

6.2 Ausblick

Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, behandelt diese Arbeit vor allem die Qualifikation des Elektronenstrahls zum selektiven Verfestigen metallischer Pulverwerkstoffe sowie zur systematischen Erzeugung, Umsetzung und Auswahl von Scanstrategien für das Elektronenstrahlschmelzen. Die Ergebnisse auf diesen Gebieten stellen Fortschritte hin zum fundierten Prozessverständnis der elektronenstrahlbasierten generativen Fertigung dar und bilden eine Basis für die Weiterentwicklung. Gleichzeitig werfen sie jedoch auch neue Fragen auf und machen neue Handlungsfelder sichtbar, um dieses Verfahren zu einer industriellen Reife zu bringen.

Obwohl für das EBM relevante Fragestellungen beantwortet werden konnten, besteht noch ein Forschungsbedarf jenseits der untersuchten Aspekte. Insbesondere Defizite hinsichtlich einsetzbarer Legierungen oder der Prozesssicherheit, die sich durch Imperfektionen in der Schichtverbindungen bzw. durch negative Effekte in der Oberflächenqualität ausdrücken, müssen für eine weitere Anwendung überwunden werden. Hier sind bspw. systematische Untersuchungen für die Prozessführung bei unterschiedlichen metallischen Werkstoffgruppen und die Sicherstellung der jeweiligen Bauteilanforderungen zu nennen. Wegen der grundlegenden Charakteristik dieser Arbeit sind dies die weiteren primären Entwicklungsaufgaben für eine industrielle Umsetzung.

Weiterhin bieten das Prinzip der Elektronenstrahlerzeugung und deren physikalische Eigenschaften Vorteile gegenüber dem überwiegend in der generativen Fertigung eingesetzten Laserstrahl. Durch die Elektronenstrahlablenkung mit elektromagnetischen Spulen können komplexe Ablenkwege bei gleichzeitig hohen Ablenkgeschwindigkeiten erzielt werden. Diese Arbeit legt den Grundstein für die industrielle Anwendung des Elektronenstrahlschmelzens (EBM) durch die Modifikation der Schweißsteuerung einer existierenden Elektronenstrahl-Universalkammeranlage. Zu einer ganzheitlichen Bewertung muss einschränkend die für die Erzeugung eines fokussierten Elektronenstrahls mit dem für das EBM erforderlichen Arbeitsabstand erforderliche Evakuierung der Arbeitskammer zu Beginn des Prozesses genannt werden. Da dieser vorbereitende Schritt jedoch nur wenige Minuten zu Beginn des Bauprozesses in Anspruch nimmt, spielt die benötigte Zeit für die Gesamtbetrachtung eine untergeordnete Rolle.

Um somit die zusätzlichen Möglichkeiten der Elektronenstrahlablenkung vollständig nutzen zu können, kann als weiterer Forschungsbedarf der Aufbau einer

für elektronenstrahlbasierte generative Fertigungsanlagen optimierte Steuerung inklusive der zugehörigen Software identifiziert werden. Erst hierdurch können die technischen Potenziale wie z. B. die Mehrfokustechnik umgesetzt und eine weitere Optimierung der Scanstrategien durchgeführt werden.

Zusammenfassend belegen die erzielten Ergebnisse wie auch die beschriebenen Handlungsfelder der möglichen technologischen Weiterentwicklung, dass das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) für zukünftige Fertigungsaufgaben industriell genutzt werden kann. Hingegen bestehen oftmals Hemmnisse hinsichtlich eingepprägter Denkweisen in der Konstruktion und der Fertigungsplanung der Unternehmen, sodass die Potenziale eines solchen neuen Prozesses nicht voll ausgeschöpft werden können. Neben der rein technologischen Entwicklung müssen daher zukünftig auch verstärkt Bemühungen getroffen werden, eine organisatorische Einbindung in Entwicklungs- und Prozessketten zu forcieren. Erst ein Zusammenspiel von technologischer und organisatorischer Entwicklung ermöglicht es, alle Vorteile des Elektronenstrahlschmelzens (EBM) voll in die Produktionstechnik zu integrieren.

7 Literaturverzeichnis

ARCAM 2010

ASTM F75 CoCr Alloy

<<http://Arcam.com/CommonResources/Files/www.Arcam.com/Documents/EBM%20Materials/Arcam-ASTM-F75-Cobalt-Chrome.pdf>> – 20.06.2010.

ARCAM 2011A

<<http://Arcam.com/CommonResources/Files/www.Arcam.com/Images/Industry%20Segments/Medical%20Implants/industrysegments-medical2-max.jpg>> – 20.2.2011.

ARCAM 2011B

EBM Systems, Software and Auxiliaries

< <http://www.Arcam.com/products/index.aspx> > – 4.10.2011.

ANOTAIPAIBOON & MAKHANOV 2004

Anotaipaboon, W.; Makhanov, S. S.: Tool path generation for five-axis NC machining using adaptive space-filling curves. International Journal of Production Research 43 (2004) 8, S. 1643-1665.

BEAMAN 2001

Beaman, J. J.: Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 12; Austin, Texas/USA 6.-8.8.2001. The University of Texas at Austin 2001, S. 584-595.

BOHEZ ET AL. 2004

Bohez, E.; Makhanov, S. S.; Sonthipermpon, K.: Adaptive nonlinear tool path optimization for five-axis machining. International Journal of Production Research 38 (2004) 17, S. 4329-4343.

BI ET AL. 2006

Bi, G.; Gasser, A.; Wissenbach, K.; Drenker, A.; Poprawe, R.: Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition. Surface and Coatings Technology 201 (2006) 6, S. 2676-2683.

BRANNER 2008

Branner, G.: Die Nase vorn im Wettbewerb. Form + Werkzeug 17 (2008) 1, S. 46-49.

BRANNER 2011

Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren. Diss. Technische Universität München (2010). München: Utz 2011. ISBN 978-3-8316-4071-3. (*iwb* Forschungsberichte 246).

BRANNER ET AL. 2006

Branner, G.; Sigl, M.; Lutzmann, S.: Optimierung von Scanstrategie und Verzugsverhalten für generative, Metall verarbeitende Fertigungsverfahren. In: 24th CADFEM Users' Meeting. International Congress on FEM Technology. Stuttgart, 25.-27.10.2006. Grafing bei München: CADFEM GmbH 2006. ISBN: 3-937523-03-0.

BUCHFINK & LEIBINGER-KAMMÜLLER 2006

Buchfink, G.; Leibinger-Kammüller, N.: Werkzeug Laser – Ein Lichtstrahl erobert die industrielle Fertigung. 1. Aufl. Würzburg: Vogel 2006.

BULLINGER 2010

Bullinger, H.-J.: Wissenstrends – Forschungstrends – Technikrends. In: Kornwachs, K. (Hrsg.): Technologisches Wissen – Entstehung, Methoden, Strukturen. Berlin: Springer 2010, S. 161-182. ISBN: 978-3-642-14371-7. (acatech diskutiert).

CORMIER 2005

Cormier, D.: Characterization of H13 steel produced via electron beam melting. Rapid Prototyping Journal 2004 (2005) 10, S. 35-41.

CORMIER ET AL. 2003

Cormier, D.; Harrysson, O.; West, H.: Characterization of high alloy steel produced via electron beam melting. In: Bourell, D. L. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 14. Austin, Texas/USA 4.-6.8.2003. The University of Texas at Austin 2003, S. 548-558.

COX ET AL. 1994

Cox, J. J.; Takezaki, Y.; Ferguson, H. R. P.; Kohkonen, K. E.; Mulkay, E. L.: Space-filling curves in tool-path applications. Computer Aided Design 26 (1994) 3, S. 215-224.

DAI & SHAW 2002

Dai, K.; Shaw, L.: Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns. Rapid Prototyping Journal 8 (2002) 5, S. 270-276.

DANCE 2002

Dance, B. G. I.: Electron beam texturing. Cambridge, United Kingdom: The Welding Institute 2002. (Progress Report 751).

DAS 2001

Das, S.: On Some Physical Aspects of Process Control in Direct Selective Laser Sintering of Metals – Part II. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 12. Austin, Texas/USA, 6.-8.8.2001. The University of Texas at Austin 2001, S. 94-101.

DAVÉ 1995

Davé, V. R.: Electron Beam Assisted Materials Fabrication. Diss. Massachusetts Institute of Technology (MIT) (1995). Cambridge, Massachusetts/USA: 1995.

DAVÉ ET AL. 1995

Davé, V. R.; Matz, J. E.; Eager, T. W.: Electron Beam Solid Freeform Fabrication of Metal Parts. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 6; Austin, Texas/USA 7.-9.8.1995. The University of Texas at Austin 1995, S. 64-71.

DECKARD 1989

Deckard, C. R.: Selective laser sintering. Diss. University of Texas (1988). Austin: University of Texas 1989.

DIN 8580 2003

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

DIN 32511 2007

DIN 32511: Schweißen – Elektronenstrahlverfahren zur Materialbearbeitung – Begriffe für Prozesse und Geräte. Berlin: Beuth 2007.

DIN 66025 1987

DIN 66025: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen; Allgemeines. Berlin: Beuth 1987.

DIN EN ISO 14744 2008

DIN EN ISO 14744: Schweißen – Abnahmeprüfung von Elektronenstrahl-Schweißmaschinen. Berlin: Beuth 2008.

DOBENECK ET AL. 2001

Dobeneck, D.; Löwer, T.; Adam, V.: Elektronenstrahlschweißen: das Verfahren und seine industrielle Anwendung für höchste Produktivität. 1. Aufl. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 2001. ISBN: 3-478-93262-9. (Die Bibliothek der Technik 221).

DOBENECK ET AL. 2002

Dobeneck, D.; Löwer, T.; Mehnhard, C.: Entwicklungspotenziale der thermischen Materialbearbeitung mit Elektronenstrahlen im Vergleich zu Laserstrahlen. In: Sepold, G. et al. (Hrsg.): Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends ; Beiträge zum 4. Laser-Anwenderforum Bremen. 12.-13.9.2002. Bremen: BIAS-Verlag 2002, S. 35-44. ISBN: 3-933762-09-X. (Strahltechnik 19).

7 Literaturverzeichnis

EDELMANN 2005

Edelmann, O.: Herstellung von metallischen Prototypen mittels LaserCUSING. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Fertigungsverfahren für alle Ansprüche; Augsburg 7.7.2005. München: Utz 2005, S. 8-1-8-22. ISBN: 978-3-89675-080-8. (*iwb* Seminarberichte 80).

EHRENSPIEL 2003

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeinsatz, Zusammenarbeit. München: Hanser 2003. (2. überarb. Aufl.). ISBN: 3-446-22119-0.

EISEN & WITT 2007

Eisen, M.; Witt, G.: Selective Laser Melting – Bauteile aus Materialien nach Kundenwunsch. RTe Journal (2007) 4.
<<http://www.rtejournal.de/ausgabe4/1115>> – 2.5.2009.

EOS 2005

EOS Electro Optical Systems GmbH: EOS GmbH – Pressemitteilungen 2004-2005. Krailling b. München: 2005.

EOS 2010

EOSINT M 280 < http://www.eos.info/fileadmin/user_upload/downloads_presse/pdf_files/Systemdatenblatt_M280_d.pdf > – 15.12.2010.

FAROUKI ET AL. 1995

Farouki, R. T.; Koenig, T.; Tarabanis, K. A.; Korein, J. U.; Batchelder, J. S.: Path Planning with Offset Curves for Layered Fabrication Processes. Journal of manufacturing systems 14 (1995) 5, S. 355-368.

FICHTNER 2009

Fichtner, D.: Einordnung der Rapid-Prototyping-Verfahren in das Ensemble der Fertigungsverfahren < http://mciron.mw.tu-dresden.de/pas/pazat_lit/for_ber/sonstig/urt-rpd.pdf > – 4.5.2009.

FIT 2011

Materialdatenblätter: <<http://www.pro-fit.de/downinfo.php>> – 25.10.2011.

FRUTH 2004

Fruth, C.: FIT bei der Herstellung von schnellen Metallbauteilen. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Vom Prototypen zur Produktion. Augsburg, 8.7.2004. München: Utz 2004, S. 7-1-7-23. ISBN: 3-89675-073-9. (*iwb* Seminarberichte 73).

GEBHARDT 2007

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren: rapid prototyping – rapid tooling – rapid manufacturing. 3. Aufl. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-22666-1.

GERMAN 1996

German, R. M.: Sintering theory and practice. New York: Wiley 1996.
ISBN: 0-471-05786-X.

GOOD 2007

Good, J.: Fabrication in Space – What Materials are Needed? In: ARCAM User's Group. Simi Valley, California/USA, 14-15.11.2007.

GRIMM 2004

Grimm, T.: User's guide to rapid prototyping. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers 2004.

GUSAROV ET AL. 2003

Gusarov, A. V.; Laoui, T.; Froyen, L.; Titov, V. I.: Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering. International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 6, S. 1103-1109.

HARRYSSON ET AL. 2003

Harrysson, O. L. A.; Cormier, D. R.; Marcellin-Little, D. J.; Jajal, K. R.: Direct Fabrication of Metal Orthopedic Implants Using Electron Beam Melting Technology. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 14. Austin, Texas/USA, 4.-6.8.2003. The University of Texas at Austin 2003, S. 439-446.

HASTRICH 2006

Hastrich, M.: Untersuchung der Einflussparameter bei der Herstellung optisch transparenter Modelle mittels Fräsen als quasi-generativem Rapid Prototyping-Verfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen (1999). Essen: 2006.

HEINL ET AL. 2007

Heinl, P.; Rottmair, A.; Körner, C.; Singer, R. F.: Cellular Titanium by Selective Electron Beam Melting. Advanced Engineering Materials 9 (2007) 5, S. 360-364.

HOFFMANN ET AL. 2010

Hoffmann, H.; Scherer, D.; Yang, Z.: Driving – a flexible manufacturing method for individualized sheet metal products. International Journal of Material Forming 3 (2010) 1, S. 955-958.

HUTFLESS 2005

Hutfless, J.: TRUMPF Laserformen – Anwendung generativer Laserverfahren für den Werkzeug- und Formenbau. RTejournal – Forum für Rapid Technologie (2005) 2. <<http://www.rtejournal.de/ausgabe2/103>> – 18.6.210.

KAHNERT ET AL. 2007

Kahnert, M.; Lutzmann, S.; Zäh, M. F.: Layer Formations in Electron Beam Sintering. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 18. Austin, Texas/USA, 6.-8.8.2007. The University of Texas at Austin 2007, S. 88-99.

KLEPPMANN 1998

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung : Produkte und Prozesse optimieren. München: Hanser 1998. ISBN: 3-446-19271-9. (Praxisreihe Qualitätswissen).

KLOCKE & ADER 2003

Klocke, F.; Ader, C.: Direct Laser Sintering of Ceramics. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 14; Austin, Texas/USA 4.-6.8.2003. The University of Texas at Austin 2003, S. 447-455.

KLOCKE & WIRTZ 1997

Klocke, F.; Wirtz, H.: Selective laser sintering of ceramics. In: Geiger, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 30th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems – Laser Assisted Net Shape Engineering 2 – LANE '97; Erlangen/Deutschland, 23.-26.9.1997. Bamberg: Meisenbach 1997, S. 589-596. ISBN: 3-87525-090-7.

KRUTH ET AL. 2003

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

KRUTH ET AL. 2004

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

KRUTH ET AL. 2005A

Kruth, J. P.; Kumar, S.; Vaerenbergh, J. V.: Study of laser-sinterability of ferro-based powders. *Rapid Prototyping Journal* 11 (2005) 5, S. 287-292.

KRUTH ET AL. 2005B

Kruth, J.-P.; Mercelis, P.; Vaerenbergh, J. V.; Froyen, L.; Rombouts, M.: Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* 11 (2005) 1, S. 616-622.

KUMAR & KRUTH 2008

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

LAHRES & RAYMAN 2006

Lahres, B.; Rayman, G.: Praxisbuch Objektorientierung: von den Grundlagen zur Umsetzung. 2. Aufl. Bonn: Galileo Press 2006. ISBN: 978-3-89842-624-4. (Galileo Computing).

LERCH 2007

Lerch, R.: Analoges Messen elektrischer Größen. In: Lerch, R. (Hrsg.): Elektrische Messtechnik – Analoge, digitale und computergestützte Verfahren. 4. Aufl. Berlin: Springer 2007, S. 119-159. ISBN: 978-3-540-73610-3.

LINDEMANN 2005

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte : Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin: Springer 2005. ISBN: 978-3-540-14041-2.

LINDEMANN & LANGER 2009

Lindemann, U.; Langer, S.: Managing Cycles in Development Processes – Analysis and Classification of External Context Factors. In: International Conference on Engineering Design 17; Stanford, California/USA 24.-27.8.2009. Stanford University 2009, S. 539-550.

LUTZMANN 2011

Lutzmann, S.: Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Diss. Technische Universität München (2010). München: Utz 2011. ISBN: 978-3-8316-4070-6. (*iwb* Forschungsberichte 245).

LUTZMANN ET AL. 2006

Lutzmann, S.; Kahnert, M.; Sigl, M.: Elektronenstrahlsintern als Zukunftstechnologie im Rapid Tooling. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing: Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder. Augsburg, 6.7.2006. München: Utz 2006, S. 7-1-7-26. ISBN: 3-89675-081-X. (*iwb* Seminarberichte 81).

MA & BIN 2007

Ma, L.; Bin, H.: Temperature and stress analysis and simulation in fractal scanning-based laser sintering. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 34 (2007) 9-10. S. 898-903.

MACHT 1999

Macht, M.: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping. Diss. Technische Universität München (1999). München: Utz 1999. ISBN: 3-89675-638-9. (*iwb* Forschungsberichte 131).

7 Literaturverzeichnis

MAHALE ET AL. 2007

Mahale, T.; Cormier, D.; Harrysson, O.; Ervin, K.: Advances in Electron Beam Melting of Aluminium Alloys. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 18. Austin, Texas/USA, 6.-8.8.2007. The University of Texas at Austin 2007, S. 312-323.

MEINDL 2005

Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. Diss. Technische Universität München (2004). München: Utz 2005. ISBN 978-3-8316-0465-4. (*iwb* Forschungsberichte 187).

MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Diss. Rheinisch- Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen (1999). Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3-8265-6571-1. (Berichte aus der Lasertechnik).

MERCELIS & KRUTH 2006

Mercelis, P.; Kruth, J.-P.: Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* 12 (2006) 5, S. 254-265.

MILBERG 2004

Milberg, J.: Wie können wir besser werden? In: Schröder, C. S. (Hrsg.): Innovationsfähigkeit. „Bildung, Forschung, Innovation: Wie können wir besser werden?“; München 11.05.2004. München: acatech – Konvent für Technikwissenschaften der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. 2004, S.11-18. (acatech Tagungsband).

MTT TECHNOLOGIES 2011

<http://www.mtt-group.com/de/selective-laser-melting_01.html> – 20.02.2011.

MÜLLER 2009

Müller, G.: Die Finite Elemente Methode: Vierzig Jahre in der Produktentwicklung. *Konstruktion; Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* 61 (2009) 10, S. 24-26.

MÜLLER & MÜLLER 2002

Müller, D. H.; Müller, H.: Rapid Prototyping Verfahren: Eigenschaften, Anwendung und Verbreitung. <http://www.ppc.biba.uni-bremen.de/projects/rp/Download/Eignung_RPV.pdf> – 23.04.2002.

NIEBLING 2005

Niebling, F.: Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2005). Bamberg: Meisenbach 2005. ISBN: 3-87525-219-5. (Fertigungstechnik Erlangen 156).

OVER 2002

Over, C.: Generative Herstellung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit "Selektive Laser Melting". Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2002). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-2245-6. (Berichte aus der Lasertechnik).

PEINSIPP 2003

Peinsipp, N.; Roos, G.; Weimer, G.: Röntgenverordnung – RöV: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen in der Neufassung vom 30. April 2003; Textausgabe mit amtlicher Begründung und Erläuterungen. 5. Aufl. Heidelberg: Forkel 2003. ISBN: 3-7719-9939-1.

PRO-BEAM 2007

pro-beam (Hrsg.): Funktionsgenerator BEDIENER 3.4. Planegg: 2007. (Bedienungsanleitung des Funktionsgenerators MiniMod).

QUI 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.

RAJAN ET AL. 2001

Rajan, V. T.; Srinivasan, V.; Tarabanis, K. A.: The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. Rapid Prototyping Journal 7 (2001) 5, S. 231-240.

RÄNNAR ET AL. 2007

Rännar, L.-E.; Glad, A.; Gustafson, C.-G.: Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting. Rapid Prototyping Journal 13 (2007) 3, S. 128-135.

REITHOFER 2010

Reithofer, N.: Mobilität neu gedacht. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): münchener kolloquium: Innovationen für die Produktion; München 6.10.2010. München: Utz 2010, S. 19-30. ISBN: 3-8316-4009-2.

SCANLAB 2007

Scanlab (Hrsg.): Mirrors in Motion: Positioning and Focusing Laser Beams. Puchheim: 2007.

7 Literaturverzeichnis

SCANLAB 2010

Applikationsmatrix

<<http://www.scanlab.de/frontend/media/Produkte/Applikationsmatrix.pdf>
> – 7.1.2010.

SCHATT 1992

Schatt, W.: Sintervorgänge: Grundlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.
ISBN: 3-18-401218-2.

SCHILLER ET AL. 1977

Schiller, S.; Heisig, U.; Panzer, S.: Elektronenstrahltechnologie. Stuttgart:
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft 1977. ISBN: 3-8047-0533-2.

SCHULTZ 2000

Schultz, H.: Elektronenstrahlschweißen. 2., völlst. überarb. und erw. Aufl.
Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren 2000. ISBN:
3-87155-192-9. (Fachbuchreihe Schweißtechnik 93).

SCHUMPETER 1926

Schumpeter, J. A.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. München:
Duncker & Humblot 1926.

SCHUTZRECHT DE4309524C1 1993

Schutzrecht DE4309524C1 Patent (25.11.1993). EOS GmbH Electro Op-
tical Systems. Pr.: 4309524. 1993-03-24. Reichle, J.; Langer, H.: Verfah-
ren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts.

SCHUTZRECHT DE10042134C2 2003

Schutzrecht DE10042134C2 Patent (12.06.2003). Concept Laser GmbH.
Pr.: 10042134. 2000-08-28. Herzog, F. C.: Verfahren zur Herstellung von
dreidimensionalen Sinter-Werkstücken.

SCHUTZRECHT DE10317822A1 2004

Schutzrecht DE 10317822A1 Patent (16.12.2004). ConceptLaser GmbH.
Pr.: 10317822.8. 2003-04-16. Herzog, F.; Herr, T.: Verfahren zum flächig-
gen, schichtweisen Abtragen oder Aufschmelzen von Materialbereichen
eines Werkstücks.

SCHUTZRECHT US473901A 1892

Schutzrecht US473901A. Patent (03.05.1892). Blanter, J. E.: Manufacture
of Contour Relief Maps.

SCHUTZRECHT US4041476A 1977

Schutzrecht US4041476A. Patent (09.08.1977). Swainson, W. K.. Pr.:
74402768. 1971-07-23. Swainson, W. K.: Method, medium and apparatus
for producing three-dimensional figure product.

SCHUTZRECHT US4863538A 1989

Schutzrecht US4863538A Patent (05.09.1989). The University of Texas. Pr.: 92058086. 1986-10-17. Deckard, C. R.: Method and apparatus for producing parts by selective sintering.

SCHUTZRECHT US5155324A 1992

Schutzrecht US 5155324A. Patent (13.10.1992). Deckard, C. R.; Beaman, J. J.; Darrah, J. F.. Pr.: US 54514290. 1990-11-09. Deckard, C. R.; Beaman, J. J.; Darrah, J. F.: Method for selective laser sintering with layerwise cross-scanning.

SCHUTZRECHT WO1994026446A1 1994

Schutzrecht WO1994026446A1. Patent (24.11.1994). Larson R.. Pr.: 9400442. 1994-11-05. Larson R.: Method and Device for producing three-dimensional bodies.

SEEFRIED 2005

Seefried, M.: Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern. Diss. Technische Universität München (2005). München: Utz 2005. (*iwb* Forschungsberichte 194).

SEIDEL 2007

Seidel, S.: Herstellung von Serienwerkzeugen mittels Metallfolien-LOM. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): 3D-Erfahrungsforum, Innovation im Werkzeug- und Formenbau; München 30. – 31.5.2007. München: Utz 2007, S. 10-11-10-17. (*iwb* Seminarberichte 85).

SIGL 2003

Sigl, M.: Rapid-Technologien im Überblick. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Mit Rapid-Technologien zum Aufschwung. Augsburg, 3.7.2003. München: Utz 2003, S. 1-1-1-30. ISBN: 3-89675-066-6. (*iwb* Seminarberichte 66).

SIGL 2008

Sigl, M.: Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns. Diss. Technische Universität München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0841-6 (*iwb* Forschungsberichte 223).

SIGL ET AL. 2006

Sigl, M.; Zäh, M. F.; Lutzmann, S.: Transient Physical Effects in Electron Beam Sintering. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 17. Austin, Texas/USA, 14. – 16.8.2006. The University of Texas at Austin 2006, S. 397-405.

SIMCHI & POHL 2003

Simchi, A.; Pohl, H.: Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder. Materials Science and Engineering A 359 (2003) 1-2, S. 119-128.

STOTKO 2005

Stotko, C. M.: e-Manufacturing: Von den Daten zum fertigen Produkt. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Rapid Manufacturing – Fertigungsverfahren für alle Ansprüche; Augsburg 7.7.2005. München: Utz 2005, S. 5-1-5-27. ISBN: 978-3-89675-080-8. (*iwb* Seminarberichte 80).

TAMINGER & HAFLEY 2002

Taminger, K. M. B.; Hafley, R. A.: Characterization of 2219 Aluminium Produced by Electron Beam Freeform Fabrication. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 13; Austin, Texas/USA 5 – 7.8.2002. The University of Texas at Austin 2002, S. 482-489.

TAMINGER ET AL. 2002

Taminger, K. M. B.; Hafley, R. A.; Dicus, D. L.: An enabling Technology for Future Space Missions. In: Keicher, D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing; San Antonio, Texas/USA 8.-10.4.2002. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation 2002, S. 51-61.

TAMINGER ET AL. 2004

Taminger, K. M. B.; Hafley, R. A.; Fahringer, D. T.; Martin, R. E.: Effect of Surface Treatments on Electron Beam Freeform Fabricated Aluminium Structures. In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings 15; Austin, Texas/USA 2.-4.8.2004. The University of Texas at Austin 2004, S. 460-470.

TECHEL ET AL. 2004

Techel, A.; Himmer, T.; Gnann, R.: Lamellenwerkzeuge mit konturfolgender Kühlung für Spritzguss- und Schäumwerkzeuge. In: Messe Erfurt (Hrsg.): Rapid.Tech: Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie; Erfurt 25.-26.5.2004. Erfurt: Desotron 2004.

TRENKE 2002

Trenke, D.: Technisches Upgrade der Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250. IMW – Institutsmitteilung (2002) 27, S. 109-113.

VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995A

Van der Schueren, B.; Kruth, J. P.: Design Aspects of a "Selective Metal Powder Sintering" Apparatus. In: van Griethuysen, J.-P. S. et al. (Hrsg.): Proceedings: International Symposium for Electro Machining. Lausanne/Schweiz, 17-21.4.1995. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 1995a, S. 651-662. ISBN: 2-88074-291-9.

VAN DER SCHUEREN & KRUTH 1995B

Van der Schueren, B.; Kruth, J. P.: Powder deposition in selective metal powder sintering. Rapid Prototyping Journal 1 (1995) 3, S. 23-31.

VDI 3404 2009

VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren – Rapid Technologien (Rapid Prototyping), Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Düsseldorf: VDI 2009.

VDI 3505 2012

VDI 3505 Blatt 2: Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing – Strahlschmelzen metallischer Bauteile; Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung. Düsseldorf: VDI 2012.

WAGNER 2003

Wagner, C.: Untersuchungen zum selektiven Lasersintern von Metallen. Diss. Technische Hochschule Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-1538. (Berichte aus der Produktionstechnik 11).

WANG ET AL. 2007

Wang, F.; Mei, J.; Wu, X.: Direct Laser Fabrication Ti6Al4V/TiB. In: Geiger, M. et al. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering 5; Erlangen/Deutschland 26.-28.9.2007. Bamberg: Meisenbach 2007, S. 475-476. ISBN: 978-3-87525-261-3.

WEISER 1995

Weiser, J.: Untersuchungen zu strahlcharakteristika und deren Auswirkungen auf die Schweißergebnisse beim Elektronenstrahlschweißen. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1994). Aachen: Shaker 1995. ISBN: 3-8265-0420-8. (Aachener Berichte Fügetechnik).

WIESNER 1989

Wiesner, P.: Technologie des Elektronenstrahlschweißens. 1. Aufl. Berlin: Verl. Technik 1989. ISBN: 3-341-00640-0.

WIRTH 2004

Wirth, P.: Introduction to Industrial Laser Materials Processing. Hamburg: Rofin 2004.

WITT 2006

Witt, G.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag 2006. ISBN: 3-446-22540-4.

WOHLERS 2010

Wohlers, T.: Wohlers Report 2010: state of the industry annual worldwide progress report. Fort Collins, Colorado/USA: Wohlers Associates 2010. ISBN: 0-9754429-6-1.

XIE ET AL. 2005

Xie, J. W.; Fox, P.; O'Neill, W.; Sutcliffe, C. J.: Effect of direct laser re-melting processing parameters and scanning strategies on the densification of tool steels. *Journal of Materials Processing Technology* 170 (2005) 3, S. 516-523.

YADROITSEV ET AL. 2007

Yadroitsev, I.; Thivillon, L.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder. *Applied Surface Science* 254 (2007) 4, S. 980-983.

YANG ET AL. 2002

Yang, Y.; Loh, H. T.; Fuh, J. Y. H.; Wang, Y. G.: Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal* 8 (2002) 1, S. 30-37.

YANG ET AL. 2003

Yang, J.; Bin, H.; Zhang, X.; Liu, Z.: Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering (SLS). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003) 3, S. 293-300.

ZÄH 2007

Zäh, M. F.: Verfahrensentwicklung zur schichtweisen Herstellung metallischer Bauteile mittels Elektronenstrahl (EBS). München: Bayerische Forschungsstiftung 2007. (Abschlussbericht).

ZÄH & KAHNERT 2006

Zäh, M. F.; Kahnert, M.: Den Elektronenstrahl für das selektive Sintern von metallischen Pulvern nutzen. In: Meyer, R. (Hrsg.): *Euro-uRapid2006*. Frankfurt/Main, 27.-28.11.2006. Frankfurt/Main: Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping 2006, S. B2/3. ISBN: 3-8167-7070-3.

ZAEH & KAHNERT 2009

Zaeh, M. F.; Kahnert, M.: The Effect of Scanning Strategies on Electron Beam Sintering. *Production Engineering* 3 (2009) 3, S. 217-224.

ZÄH ET AL. 2006

Zäh, M. F.; Sigl, M.; Seefried, M.; Hagemann, F.; Kahnert, M.; Müller, A.; Meindl, M.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. 1. Aufl. München: Carl Hanser 2006. ISBN: 3-446-22854-3.

ZAEH ET AL. 2007A

Zaeh, M. F.; Kahnert, M.; Branner, G: Adaptive Scanning Strategies for Metal Processing, Additive Layer Manufacturing Methods. In: Geiger, M. et al. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering 5. Erlangen/Deutschland, 26.-28.9.2007. Bamberg: Meisenbach 2007, S. 441-455. ISBN: 978-3-87525-261-3.

ZAEH ET AL. 2007B

Zaeh, M. F.; Lutzmann, S.; Branner, G.: Investigations of the Energy Input of Different Metal Processing, Additive Layer Manufacturing Methods. In: Bártolo, P. J. et al. (Hrsg.): 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, VRAP 2007; Leiria, Portugal 24.-29. September 2007. London: Taylor & Francis 2007, S. 635-640.

ZÄH ET AL. 2007C

Zäh, M. F.; Straßer, G.; Branner, G.; Lutzmann, S.: Untersuchung und Simulation der Energieeinkopplung bei Metall verarbeitenden generativen Verfahren. Rapid.Tech Fachmesse für Rapid-Technologien. Erfurt May 22 – 23.05.2007, S 36.

ZENKER 2003

Zenker, R.: Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung: Innovative Technologien für höchste Ansprüche. Planegg: pro-beam 2003.

8 Anhang

8.1 Diagramm zur Beschreibung von Scanstrategien

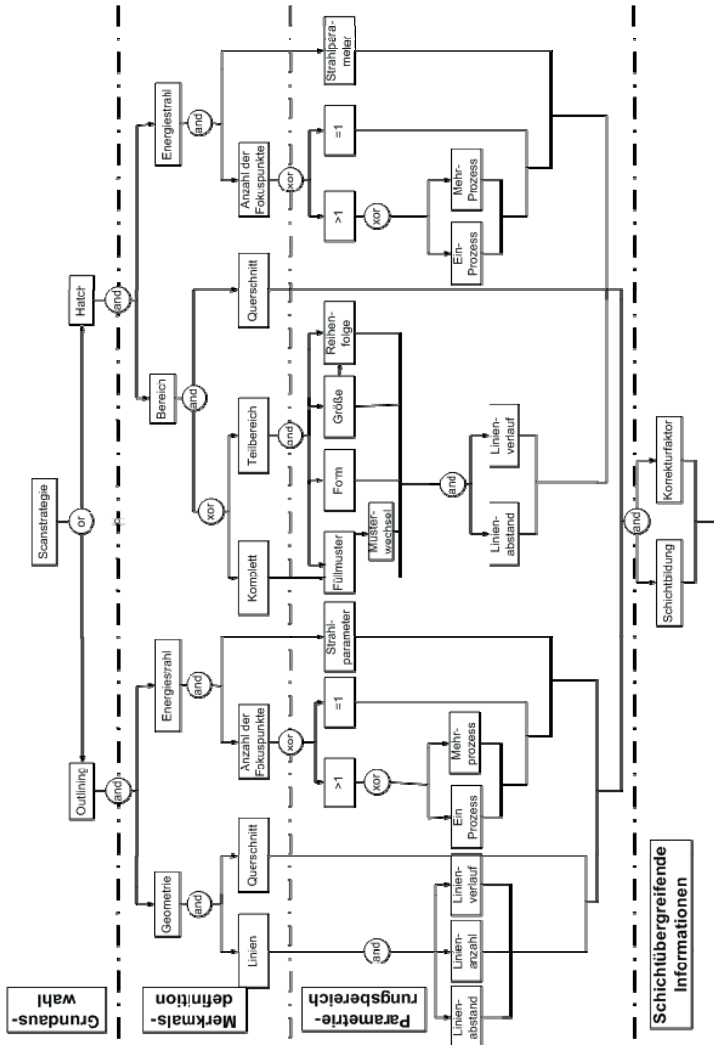


Abbildung 87: Diagramm zur Beschreibung von Scanstrategien (detaillierte Darstellung zur Abbildung 33 in Abschnitt 3.2.4)

8.2 Beispiel einer MiniMod-Datei

Ausgewählte Schichtkontur im entwickelten Softwaretool.

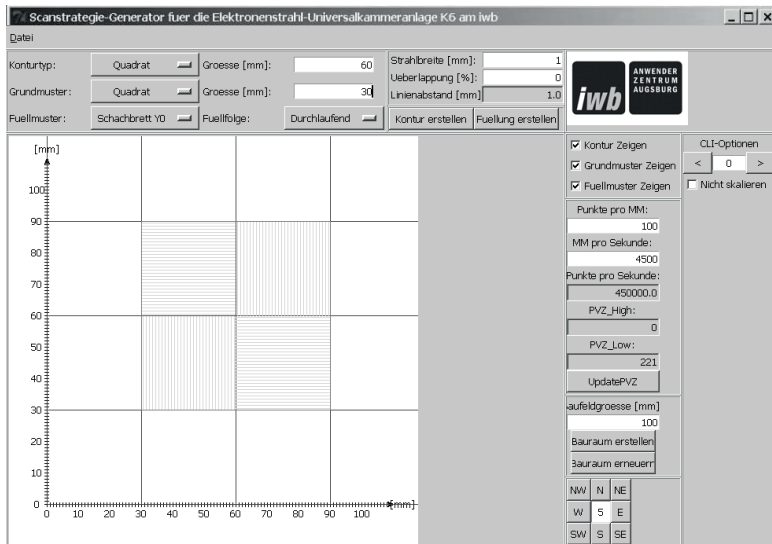


Abbildung 88: GUI zur Erzeugung einer Scanstrategie

Beispiel einer *MiniMod*-Datei

```
#Vector
#Figure QuadratDurchlaufend
DATA
ABS -0.39 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.37 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.35 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.33 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.31 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.29 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.27 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.25 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.23 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.21 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.19 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.17 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.15 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.13 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.11 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.09 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.07 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.05 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.03 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.01 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.01 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.03 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.05 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.07 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.09 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.11 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.13 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.15 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.17 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.19 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.21 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.23 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.25 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.27 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.29 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.31 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.33 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.35 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.37 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.39 -0.4
REL 0.0 0.6 3000
```

REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.4 0.69	ABS 0.2 -0.17	ABS 0.2 0.17	ABS 0.51 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.4 0.71	ABS 0.2 -0.15	ABS 0.2 0.19	ABS 0.53 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.4 0.73	ABS 0.2 -0.13	ABS 0.21 0.2	ABS 0.55 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.4 0.75	ABS 0.2 -0.11	ABS 0.23 0.2	ABS 0.57 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.4 0.77	ABS 0.2 -0.09	ABS 0.25 0.2	ABS 0.59 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS -0.4 0.79	ABS 0.2 -0.07	ABS 0.27 0.2	ABS 0.61 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.39	ABS 0.2 -0.05	ABS 0.29 0.2	ABS 0.63 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.37	ABS 0.2 -0.03	ABS 0.31 0.2	ABS 0.65 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.35	ABS 0.2 -0.01	ABS 0.33 0.2	ABS 0.67 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.33	ABS 0.2 0.01	ABS 0.35 0.2	ABS 0.69 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.31	ABS 0.2 0.03	ABS 0.37 0.2	ABS 0.71 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.29	ABS 0.2 0.05	ABS 0.39 0.2	ABS 0.73 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.27	ABS 0.2 0.07	ABS 0.41 0.2	ABS 0.75 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.25	ABS 0.2 0.09	ABS 0.43 0.2	ABS 0.77 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.23	ABS 0.2 0.11	ABS 0.45 0.2	ABS 0.79 0.2
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	REL 0.0 0.6 3000
ABS 0.2 -0.21	ABS 0.2 0.13	ABS 0.47 0.2	END
REL 0.6 0.0 3000	REL 0.6 0.0 3000	REL 0.0 0.6 3000	EOF
ABS 0.2 -0.19	ABS 0.2 0.15	ABS 0.49 0.2	

8.3 NC-Programme

Hauptprogramm

```

; *****
; Programm zum Bauteilaufbau mittels Minimod
; Aufruf verschiedener Unterprogramme
; Variablendefinition über R-Parameter
; Datum: 10.5.2007
; *****

;*****
;benötigte globale Variablen
;*****

def string[50] _logfile_name
def int _r_logerror
def int _r_akttime
def int _i_log_nr=0
def int _schichtenzahl=0
def int _Max_Schichten

msg("Logfile wird eingeschaltet! – Beginn mit -Cycle Start-")
m0: Bestätigung
$AC_TIMER[1]=0; Start des globalen Timers
g90

; *****
; Variablendefinition
; *****

msg ("Variablen Einlesen")

call $P_PROGPATH<<"_N_VARI_VORHEIZ_MPF"
call $P_PROGPATH<<"_N_VARI_INIT_MPF"
call $P_PROGPATH<<"_N_VARI_ISCH_MPF"

call $P_PROGPATH<<"_N_VARI_BEL_MPF"
call $P_PROGPATH<<"_N_VARI_NSCH_MPF"

; *****
; Initialisierung der Anlage
; *****

_logfile_name=$p_progpath<<"zz_log_"<<R113<<R114<<R1
15<<"_"<<R116<<"_"<<R117
_i_log_nr=0
R119=_i_log_nr

msg("Initialisieren der Anlage!")
call $P_PROGPATH<<"_N_INIT_MPF"

_Max_Schichten=R353

; ** Ereignis in Log-Datei schreiben

_r_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_r_logerror,_logfile_name,R119<<"-
"<<_r_akttime<<": Initialisierung abgeschlossen;")
R119=R119+1

; *****
; Vorheizen
; *****

_r_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_r_logerror,_logfile_name,R119<<"-
"<<_r_akttime<<": Platte vorheizen begonnen;")
R119=R119+1

msg ("Vorheizen der Platte beginnt!!!")

```

8.3 NC-Programme

```
call $P_PROGPATH<<"_N_Vorheizen_MPF"

_r_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_r_logerror_logfile_name,R119<<"-
"<<_r_akttime<<"; Platte vorheizen abgeschlossen;")
R119=R119+1

; *****
; 1.Pulverschicht aufrufen
; *****

_r_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_r_logerror_logfile_name,R119<<"-
"<<_r_akttime<<"; Auftrag 1. Pulverschicht begonnen;")
R119=R119+1

msg ("1. Pulverschichtaufrufen!!!")
call $P_PROGPATH<<"_N_1Schicht_MPF"

; *****
; 1.Pulverschicht verfestigen
; *****

_r_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_r_logerror_logfile_name,R119<<"-
"<<_r_akttime<<"; Verfestigung 1. Pulverschicht begonnen;")
R119=R119+1

_schichtenzahl=_schichtenzahl+1

msg ("1. Verfestigung!!!")
call $P_PROGPATH<<"_N_Verfestigen_MPF"

; *****
; Beginn der Schleife
; *****

IF _Max_Schichten==1
GOTOF ENDE
ENDIF

Schleife:

; *****
; 1.Pulverschicht aufrufen
; *****

_schichtenzahl=_schichtenzahl+1

_r_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_r_logerror_logfile_name,R119<<"-
"<<_r_akttime<<"; Auftrag "<<_schichtenzahl<<".
Pulverschicht begonnen;")
R119=R119+1

msg (_schichtenzahl<<". Pulverschichtaufrufen!!!")
call $P_PROGPATH<<"_N_NSchicht_MPF"

; *****
; N.Pulverschicht verfestigen
; *****

_r_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_r_logerror_logfile_name,R119<<"-
"<<_r_akttime<<"; Verfestigung "<<_schichtenzahl".
Pulverschicht begonnen;")
R119=R119+1

_schichtenzahl=_schichtenzahl+1

msg (_schichtenzahl<<". Verfestigung!!!")
call $P_PROGPATH<<"_N_Verfestigen_MPF"

IF _schichtenzahl<_Max_Schichten
```

```
GOTOB SCHLEIFE
ENDIF
```

ENDE:

m02

Platte vorheizen

```
; *****
; Platte Vorheizen
; Erstellt: 10.5.2007
; Markus Kahnert
; *****

def int _vp_kalwert
def int _vp_hv
def int _vp_fig
def int _vp_anz_punkt
def int _vp_frq
def int _vp_pvh
def int _vp_pvl
def real _vp_x_fig_breite
def real _vp_y_fig_breite
def real _vp_y_fig_pos
def real _vp_x_fig_pos
def real _vp_lens
def real _vp_heizstrom
def int _vp_dauer
def int _temp

; ** Ereignis in Log-Datei schreiben
; ** Bilden des Logfilenamens iwb_yymmdd_hh_mm

def int _vp_logerror=0
def int _vp_akttime
def string[200] _vp_logtext

def string[50] _logfile_name
_logfile_name=$p_progpath<<"_n_zz_log."<<R113<<R114<<
R115<<" "<<R116<<" "<<R117
; *****
; Variablendefinition
; *****

; *****
; Werteuebergabe
; *****

_vp_kalwert = R151; Kalibrierwert []
_vp_hv = R152; Hochspannung [kV]
_vp_fig = R153; Figurnummer []
_vp_anz_punkt = R154; Punktzahl []
_vp_frq = R155; Frequenz [Hz]
_vp_pvh = R156; Punktverzögerung_high [ns]
_vp_pvl = R157; Punktverzögerung_low [ns]
_vp_x_fig_breite = R158; x-Figurbreite [mm]
_vp_y_fig_breite = R159; y-Figurbreite [mm]
_vp_y_fig_pos = R160; y-Figurposition [mm]
_vp_x_fig_pos = R161; x-Figurposition [mm]
_vp_lens = R162; Linsenstrom [mA]
_vp_heizstrom = R163; Heizstrom [mA]
_vp_dauer = R164; vorheizdauer [sec]

; *****
; Program initialisieren
; *****

; ** Kalibrierwert **
Kalwert(_vp_kalwert)

; ** Hochspannung
wrt(s_hv, _vp_hv)
sns
```

```

; ** Bemaßungsart
g90

; ** Figur einrichten **
wrt(s_fig,_vp_fig,s_freq,_vp_freq,s_swx,_vp_x_fig_breite,s_swy,
    _vp_y_fig_breite)
sns

; ** Figur positionieren **
wrt(s_su,_vp_x_fig_pos,s_sv,_vp_x_fig_pos)
sns

; ** Linsenstrom **

g0 sl _vp_lens)
g0 sq 0); Strahl aus

; ** Richtigen Strahlstromregler wählen

if _vp_heizstrom<10
IB10PROZENT
else
IB100PROZENT
ENDIF

; ** Definierter Halt
msg("Zum Vorheizen der Platte –Cycle Start- drücken")
m0; kurze Sicherheitsabfrage

_vp_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_vp_logerror,_logfile_name,R119<<"
"<<_vp_akttime<<"; Vorheizen gestartet;")
R119=R119+1

$AC_TIMER[2]=0; Start Vorheizzeit
g0 sq _vp_heizstrom); Strahlstrom ein

vzh_start:           ; Sprungstelle

; ** Ausgabe der Zeit

_vp_akttime=$AC_TIMER[2]

msg("Vorheizen der Platte läuft seit "<<(_vp_akttime DIV
60)<<" min und "<<(_vp_akttime MOD 60)<<" sec von
"<<(_vp_dauer DIV 60)<<" min und "<<(_vp_dauer MOD
60)<<"sec")

; ** Überprüfung der Zeit

if $AC_TIMER[2] < _vp_dauer;
gotob vzh_start
ENDIF
sq 0)
$AC_TIMER[2]=1
_temp=$AC_TIMER[2]

; ** Vorheizdauer, Strom, Linsenstrom in Log-Datei schreiben
_vp_akttime=$AC_TIMER[1]
_vp_logtext=R119<<" "<<_vp_akttime<<"; Dauer:
"<<_temp<<"; sq: "<<_vp_heizstrom<<"; sl: "<<_vp_lens<<";
Figur: "<<_vp_fig<<"; Frequenz: "<<_vp_freq<<"; pvzlpvzh:
"<<_vp_pvh<<"; "<<_vp_pv<<"; Breite:
"<<_vp_x_fig_breite<<"; x-Position: "<<_vp_x_fig_pos<<"; y-
Position: "<<_vp_y_fig_pos
WRITE(_vp_logerror,_logfile_name,_vp_logtext)
R119=R119+1

M02

1. Schichtauftrag mit Pulvervorheizen

; *****
; 1.Schicht
; Erstellt: 14.5.2007

; *****
; ** Lokale Variablen
; ** Log-Datei erstellen

def int _es_logerror=0
def int _es_akttime
def string[50] _logfile_name
def real _es_aktv
def real _es_aktx
def string[200] _log_text

; *****
; Werte übergeben
; *****

_es_kalwert = R201; Kalibrierwert []
_es_hv = R202; Hochspannung [kV]
_es_fig = R203; Figurnummer []
_es_anz_punkt = R204; Punktzahl []
_es_freq = R205; Frequenz [Hz]
_es_pvh = R206; Punktverzögerung_high [ns]
_es_pvl = R207; Punktverzögerung_low [ns]
_es_x_fig_breite = R208; x-Figurbreite [mm]
_es_y_fig_breite = R209; y-Figurbreite [mm]
_es_y_fig_pos = R210; y-Figurposition [mm]
_es_x_fig_pos = R211; x-Figurposition [mm]
_es_lens = R212; Linsenstrom [mA]
_es_rakelaus = R213; rakelausgang [mm]
_es_rakelmitte = R214; rakelmitte [mm]
_es_rakelfertig = R215; rakelfertig [mm]
_es_schichtdicke = R216; schichtdicke [mm]
_es_sicherheitsdicke = R217; sicherheitsdicke [mm]
_es_v_rakel = R218; Rakelvorschub [mm/min]
_es_v_platte = R219; Bauplattformvorschub [mm/min]
_es_strom1 = R220; Vorheizstrom1 [mA]
_es_strom2 = R221; Vorheizstrom2 [mA]
_es_t halte = R222; haltezeit [s]
_es_f_strom1 = R223; rampe_strom1 [mA/sec]
_es_f_strom2 = R224; rampe_strom2 [mA/sec]

; ** Logfilename bilden
_logfile_name=$p_propath<<"_n_zz_log_"<<R113<<R114<<
R115<<"_"<<R116<<"_"<<R117

; ** Message schreiben
_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<"; 1. Schichtauftrag
gestartet;";
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)

```

8.3 NC-Programme

```
R119=R119+1

;gotof pulver_vor

;*** Aktuelle Positionen schreiben
_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_es_aktx = $SAA_IM[X]
_es_akty = $SAA_IM[Y]
_log_text = R119<<" "<<_es_akttime<<"; (Rakel)x-Position:
"<<_es_aktx<<"; (Bauplattform)y-Position"<<_es_akty
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
R119=R119+1

;*** Eingestellte Werte schreiben
_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<"; Rakel-
start:"<<_es_rakelauss<<"; Rakelmitte:"<<_es_rakelmitte<<";
Rakelende:"<<_es_rakelfertig<<"; Schichtdicke:
"<<_es_schichtdicke<<"; Sicherheitsdicke:"<<_es_schichtdicke
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
R119=R119+1

.*****
; 1. Schichtauftrag
.*****

msg("1. Schichtauftrag; Schichtdicke: "<<_es_schichtdicke)

g90
g1 x=_es_rakelfertig f=_es_v_rakel; Rakel auf Endposition mit
Pulver fahren
g91
g1 y=_es_sicherheitsdicke f=_es_v_platte; Bauplatte für
Rakelrückfahrt absenken
g90
g1 x=_es_rakelmitte f=_es_v_rakel; Rakel in die Mitte Fahren
g91
g1 y=2*( _es_sicherheitsdicke) f=_es_v_platte; Vorratsbehälter
für die Rückfahrt absenken
g90
g1 x=_es_rakelfertig f=_es_v_rakel
g91
g1 y=-1*((_es_schichtdicke)+(_es_sicherheitsdicke)) f=10
g90
g1 x=_es_rakelmitte f=_es_v_rakel; Rakel in die Mitte Fahren
g91
g1 y=_es_schichtdicke f=_es_v_platte; Vorbereitung für n-
Schichtauftrag
g90

;*** Message schreiben
_es_akttime=$AC_TIMER[1]
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,R119<<"
"<<_es_akttime<<"; 1. Schichtauftrag Ende;")
R119=R119+1

pulver_vor:

;*** Aktuelle Positionen schreiben
_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_es_aktx = $SAA_IM[X]
_es_akty = $SAA_IM[Y]
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,R119<<"
"<<_es_akttime<<"; (Rakel)x-Position: "<<_es_aktx<<";
(Bauplattform)y-Position"<<_es_akty)
R119=R119+1

.*****
; Pulver vorheizen
.*****

;*****
; Werte einstellen
;*****

; ** Kalibriertwert **

Kalwert(_es_kalwert)

;*** Hochspannung
wrt(s_hv,_es_hv)
sns

;*** Bemaßungsart
g90

; ** Figur einrichten **
wrt(s_fig,_es_fig,s_freq,_es_freq,s_swx,_es_x_fig_breite,s_swy,_
es_y_fig_breite)
sns

; ** Figur positionieren **
wrt(s_su,_es_x_fig_pos,s_sv,_es_x_fig_pos)
sns

; ** Linsenstrom **

g0 sl _es_lens)
g0 sq 0; Strahl aus

msg("Pulver wird vorgeheizt")

; **** Message schreiben
_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<"; 1. Pulveraufheizen
gestartet;"
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
r119=r119+1

; *** eingestellte Werte schreiben
_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=r119<<" "<<_es_akttime<<"Figurnummer:
"<<_es_fig<<; Frequenz: "<<_es_freq<<; Figurbreite:
"<<_es_x_fig_breite<<; fig-x-pos: "<<_es_x_fig_pos<<; fig-
y-pos: "<<_es_y_fig_pos
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
r119=R119+1

;***** 1. Stromrampeampe

_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<"; 1. Stromrampe
Beginn;"
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
R119=R119+1

g1 sq _es_strom1) f=_es_f_strom1

_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<"; 1. Stromrampe fertig;"
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
R119=R119+1

_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<";
Strom1:"<<_es_strom1<<; Rampe_Strom2:
"<<_es_f_strom1<<; Linsenstrom: "<<_es_lens
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
R119=R119+1

g1 sq _es_strom2) f=_es_f_strom2

_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<"; 2. Stromrampe fertig;"
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
R119=R119+1

_es_akttime=$AC_TIMER[1]
_log_text=R119<<" "<<_es_akttime<<";
Strom2:"<<_es_strom2<<; Rampe_Strom2:
"<<_es_f_strom2<<; Linsenstrom: "<<_es_lens<<; Haltezeit:
"<<_es_t_halte
WRITE(_es_logerror,_logfile_name,_log_text)
```



```
R119=R119+1
g4 f=_es_t_halte
g0 sq 0)
g0 sl _es_lens)

m02
```

n. Pulverschicht auftragen mit Vorheizen

```
; *****
; N.Schicht
; Erstellt: 14.5.2007
; *****

;*****
;VARIABLENDEKLARATION
;*****

def int _ns_kalwert
def int _ns_hv
def int _ns_fig
def int _ns_frq
def real _ns_x_fig
def real _ns_y_fig
def real _ns_x_fig_pos
def real _ns_y_fig_pos
def real _ns_lens
def real _ns_schichtdicke
def real _ns_sicherheitsdicke
def real _ns_rakelaus
def real _ns_rakelmitte
def real _ns_rakelfertig
def real _ns_f_Rakel_max
def real _ns_f_Rakel_heiz
def real _ns_f_platte
def real _ns_Strom_start
def real _ns_Strom1
def real _ns_Strom2
def real _ns_Haltezeit

_ns_kalwert = R275
_ns_hv = R276
_ns_fig = R277
_ns_frq = R278
_ns_x_fig = R279
_ns_y_fig = R280
_ns_x_fig_pos = R281
_ns_y_fig_pos = R282
_ns_lens = R283
_ns_schichtdicke = R284
_ns_sicherheitsdicke = R285
_ns_rakelaus = R286
_ns_rakelmitte = R287
_ns_rakelfertig = R288
_ns_f_Rakel_max = R289
_ns_f_Rakel_heiz = R290
_ns_f_platte = R291
_ns_Strom_start = R292
_ns_Strom1 = R293
```

```
_ns_Strom2 = R294
_ns_Haltezeit = R295
```

```
;*****
;KALIBRIERUNG
;*****
```

```
KALWERT(_ns_kalwert)
```

```
WRT(S_HV,_ns_hv)
SNS
```

```
WRT(S_FIG,_ns_fig,S_FRQ,_ns_frq,S_SWX,_ns_x_fig,S_SW
Y,_ns_y_fig)
SNS
```

```
SL _ns_lens)
g0 sq 0)
```

```
; *****
;n-ter SCHICHTAUFTRAG
; *****
```

```
g91
g1 y=_ns_schichtdicke f=_ns_f_platte
g90
g1 x=_ns_rakelfertig f=_ns_f_Rakel_max
g91
g1 y=_ns_sicherheitsdicke f=_ns_f_platte
g90
g1 x=_ns_rakelmitte f=_ns_f_Rakel_max
g91
g1 y=2*( _ns_sicherheitsdicke) f=_ns_f_platte
g90
```

```
;*****
;AUFHEIZEN DER n-ten PULVERSCHICHT
; *****
```

```
IB100PROZENT
```

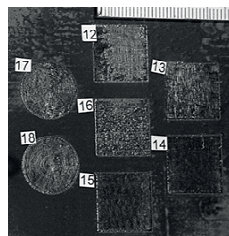
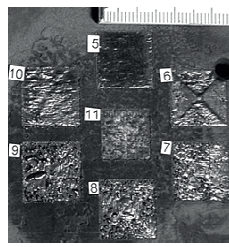
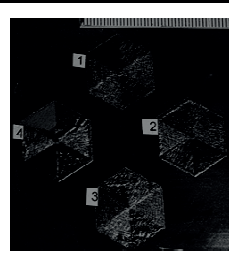
```
g90
```

```
g0 sq _ns_Strom_start)
g4 fl
g1 sq _ns_Strom1) x=_ns_rakelaus f=_ns_f_Rakel_heiz
g91
g1 y=-1*( _ns_schichtdicke)+( _ns_sicherheitsdicke)
f=_ns_f_platte
g90
IB100PROZENT
g90
g0 sq _ns_Strom1)
g4 f=_ns_Haltezeit
g1 sq _ns_Strom2) x=_ns_rakelmitte f=_ns_f_Rakel_heiz
g91
g1 y=_ns_schichtdicke f=_ns_f_platte
g90
```

```
M02
```

8.4 Versuchsübersicht des Abschnitts 4.4.3

Varierte Parameter					Bauplatte
	Form	Füllmuster	Hatch- linien- abstand [mm]	Größe [mm]	
1	Hexagon	Spirale, von innen nach außen	0,1	20	1
2	Hexagon	Spirale, von außen nach innen	0,1	20	
3	Hexagon	äquidistante Linien, von innen nach außen	0,1	20	
4	Hexagon	Konzentrisch, von außen nach innen	0,1	20	
5	Quadrat	X-Hatch, 1 Richtung	0,1	15	2
6	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	15	
7	Quadrat	äquidistante Linien, von innen nach außen	0,1	15	
8	Quadrat	Spirale, von innen nach außen	0,1	15	
9	Quadrat	Spirale, von außen nach innen	0,1	15	
10	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	15	
11	Quadrat	Hilbert-Kurve	0,1	8	3
12	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,2	15	
13	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	15	
14	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,05	15	
15	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,025	15	
16	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,4	15	
17	Kreis (angenähert durch 100 Ecken)	Spirale, von innen nach außen	0,2	Ø 20	
18	Kreis (angenähert durch 100 Ecken)	Spirale, von innen nach außen	0,1	Ø 20	



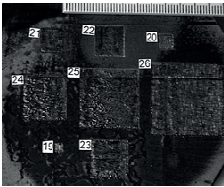
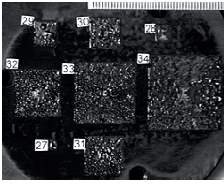
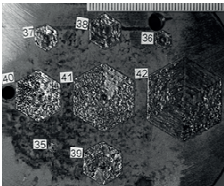
19	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	2,5	4	
20	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	5		
21	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	7,5		
22	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	10		
23	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	12,5		
24	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	15		
25	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	20		
26	Quadrat	X-Hatch, 2 Richtungen	0,1	25		
27	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	2,5	5	
28	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	5		
29	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	7,5		
30	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	10		
31	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	12,5		
32	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	15		
33	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	20		
34	Quadrat	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	25		
35	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	2,5	6	
36	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	5		
37	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	7,5		
38	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	10		
39	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	12,5		
40	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	15		
41	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	20		
42	Hexagon	äquidistante Linien, von außen nach innen	0,1	25		

Tabelle 21: Übersicht der in Abschnitt 4.4.3 durchgeführten Versuche

8.5 Versuchsübersicht der Abschnitte 4.5.2 und 4.5.4

#	Erfolg	Strahlstrom [mA]	Schichtdicke [mm]	Ablenk- geschwindig-keit [m/s]	Strahlleistung [W]	Hatch-abstand [mm]	Energiedichte [J/mm ³]	Hatch	Bewertung Oberfläche (1-10)	Bewertung Schichtzusam- menhalt(1-10)
48		1,50	0,30	4,90	150	0,1	1,02	x-Hatch	0	0
49	ja	1,50	0,20	4,90	150	0,1	1,55		7	3
50		3,00	0,30	2,78	300	0,1	3,59		4	7
52		4,00	0,30	4,90	400	0,1	2,72		3	6
53	ja	4,00	0,30	11,44	400	0,1	1,17		7	3
54		4,00	0,30	7,92	400	0,1	1,68		0	0
55		4,00	0,30	7,92	400	0,1	1,68		3	0
56		4,00	0,30	8,58	400	0,1	1,55		4	5
57		4,00	0,30	8,58	400	0,1	1,55		0	0
58		4,00	0,30	8,58	400	0,1	1,55		0	0
59		4,00	0,30	8,58	400	0,1	1,55		0	0
60	ja	4,00	0,40	8,58	400	0,1	1,17		9	2
61	ja	4,00	0,40	8,58	400	0,1	1,17		9	2
62	ja	4,00	0,20	8,58	400	0,1	2,33		4	5
63	ja	4,00	0,20	8,58	400	0,1	2,33		6	4
64	ja	4,00	0,20	8,58	400	0,1	2,33		8	5
65	ja	4,00	0,20	11,44	400	0,1	1,75		6	4
66	ja	4,00	0,20	11,44	400	0,1	1,75		6	4
68		4,00	0,20	11,44	400	0,1	1,75	xy-Hatch (alternie- rend)	7	5
70	ja	4,00	0,20	8,58	400	0,1	2,33		5	6
71	ja	5,00	0,20	8,58	500	0,1	2,91		4	6
72	ja	4,00	0,20	11,44	400	0,1	1,75		6	5
73		5,00	0,20	8,58	500	0,1	2,91		0	0
74		4,00	0,20	8,58	400	0,1	2,33		3	4
75		5,00	0,20	11,44	500	0,1	2,18		0	0
76		5,00	0,20	8,58	500	0,1	2,91		0	0
77	ja	2,00	0,20	4,90	200	0,1	2,04		9	5
78	ja	6,00	0,20	20,60	600	0,1	1,46		8	6
79	ja	5,00	0,20	8,58	500	0,1	2,91		7	7
80	ja	4,00	0,20	8,58	400	0,1	2,33		6	5
81	ja	5,00	0,20	11,44	500	0,1	2,18		8	5
82	ja	4,00	0,20	11,44	400	0,1	1,75		10	5
83		5,00	0,20	11,44	500	0,1	2,18		2	2
84	ja	5,00	0,20	11,44	500	0,1	2,18		6	5

#	Erfolg	Strahlstrom [mA]	Schichtdicke [mm]	Ablenk- geschwindig- keit [m/s]	Strahlleistung [W]	Hatch-abstand [mm]	Energiedichte [J/mm ²]	Hatch	Bewertung Oberfläche (1-10)	Bewertung Schichtzusam- menhalt(1-10)
85		4,00	0,20	11,44	400	0,1	3,50	xy-Hatch (bidirek- tional)	0	0
86		3,00	0,20	8,58	300	0,1	3,50		0	0
87		2,00	0,20	8,58	200	0,1	2,33		0	0
88		2,50	0,20	8,58	250	0,1	2,91		5	6
89		2,25	0,20	8,58	225	0,1	2,62		7	4
90	ja	3,50	0,20	14,71	350	0,1	2,38		7	7
92	ja	3,50	0,20	14,71	350	0,1	2,38		7	7
93	ja	3,50	0,20	14,71	350	0,1	2,38		7	7
94	ja	3,25	0,20	11,44	325	0,1	2,84		6	5
96		3,00	0,20	11,44	300	0,1	2,62		0	0
97		2,75	0,20	8,58	275	0,1	3,20		0	0
101	ja	2,00	0,20	11,44	200	0,1	1,75		8	4
102	ja	2,50	0,15	11,44	250	0,1	2,91		5	7
103		2,75	0,15	11,44	275	0,1	3,20		0	0

Tabelle 22: Übersicht der in den Abschnitten 4.5.2 und 4.5.4 durchgeführten Versuche

8.6 Versuchsübersicht des Abschnitts 5.3

Aufgeführt werden in dieser Übersicht Versuche, bei welchen kein Prozessabbruch, bspw. aufgrund Maschinenfehlfunktionen, zu geringer Oberflächenqualität oder des Klemmens des Rakels an unregelmäßigen Aufschmelzungen der obersten Schicht, stattfand.

#	Leistung [W]	Ablenk- geschwindigkeit [m/s]	Hatch [mm]	Energie- dichte ED [J/mm²]	Schicht- zusammen- halt [1-10]	Oberfläche [1-10]
1004	450	10	0,1	2,25	4	3
1006	450	20	0,1	2,25	5	2
1009	400	18	0,05	2,22	5	3
1014	550	25	0,05	2,2	4	4
1016	250	5	0,1	2,5	5	4
1017	250	10	0,05	2,5	4	8
1019	250	20	0,025	2,5	4	8
1020	500	10	0,1	2,5	4	3
1024	250	9	0,05	2,777	3	6
1032	250	20	0,025	2,5	5	7
1033	250	17	0,025	2,941	4	7
1034	150	3,3	0,1	2,727	3	5
1036	150	11	0,025	2,727	6	8

Tabelle 23: Übersicht der in Abschnitt 5.3 durchgeführten Versuche

8.7 In der Arbeit genannte Firmen

Arcam AB (publ.)

Krokslätts Fabriker 27A
SE-431 37 Mölndal / Sweden
Web: www.Arcam.com

EOS GmbH

Electro Optical Systems
Robert-Stirling-Ring 1
82152 Krailling
Web: www.eos.info

SLM Solutions GmbH

Roggenhorster Strasse 9 c
23556 Lübeck
Web: [www. http://www.slm-solutions.com](http://www.slm-solutions.com)

pro-beam AG & Co. KGaA

Behringstr. 6
82152 Planegg bei München
Web: www.pro-beam.com

SCANLAB AG

Siemensstr. 2a
82178 Puchheim
Web: www.scanlab.de

CONCEPT Laser GmbH

An der Zeil 8
96215 Lichtenfels
Web: www.concept-laser.de/

FIT GmbH

Gewerbegebiet Lupburg-
Eichenbühl 10
92331 Parsberg
Web: www-pro-fit.de

MTT Technologies Ltd.

Whitebridge Way, Whitebridge
Park, Stone,
Staffordshire ST15 8LQ.
England
Web: www.mtt-group.com

pro-beam systems GmbH (Anlagenbau)

Weststr. 31
09221 Neukirchen/Chemnitz
Web: www.pro-beam.com

Seminarberichte IWB

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

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

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb-/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 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur 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 - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · 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 3-98675-069-0
- 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-Erfahrungsforschung · 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
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik · Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten · ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion – Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing · Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik · Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten · ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten · ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik · Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten · ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld · Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten · ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 · Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten · ISBN 978-3-89675-097-6

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

Forschungsberichte IWB

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

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

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

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

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

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

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

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungs Genauigkeit beim Schweißrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten · ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten · ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten · ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten · ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irrenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten · ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spannenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten · ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahner:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärrens
128 Seiten · ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten · ISBN 978-3-8316-4452-0

