

Methodische Einbindung von
Wirtschaftlichkeitsaspekten und
Gestaltungsempfehlungen für das
selektive Elektronenstrahlschmelzen mit
der Titanlegierung Ti6Al4V in den
Konstruktionsprozess

Von der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Süß
geboren am 29. Juli 1988 in Erlabrunn

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer
Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer

Tag der Einreichung: 14. April 2021

Tag der Verteidigung: 15. März 2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Konstruktionstechnik/CAD der Technischen Universität Dresden und am Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer für die Betreuung dieser Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken.

Ein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback, Frau Dr.-Ing. habil. Christine Schöne sowie Herrn Dr.-Ing. Thomas Weißgärber für deren Bestrebungen zur Initiation dieser Arbeit sowie steter Bereitschaft zur fachlichen Diskussion, die zum Entstehen der Arbeit beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich überaus herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen an beiden Instituten für den starken und freundschaftlichen Zusammenhalt, die konstruktive Kritik sowie die fachliche und moralische Unterstützung. Insbesondere bei Herrn Dr. rer. nat. Burghardt Klöden und Herrn Dr.-Ing. Alexander Kirchner sowie der Arbeitsgruppe ‚Additive Fertigung – Elektronenstrahlschmelzen‘ am IFAM für die praktische Unterstützung und Herstellung zahlreicher Demonstratoren. Bei Frau Dr.-Ing. habil. Christine Schöne, Herrn Dr.-Ing. Stefan Holzhausen und Herrn Dirk Hofmann sowie der gesamten Arbeitsgruppe ‚Reverse Engineering‘ der Professur für Konstruktionstechnik/CAD für die Durchführung unzähliger Messungen. Ebenso gilt mein Dank den studentischen Hilfskräften Johannes Beyer, Florian Häslich, Mario Herzog, Lucas Hofmann, Bernhard Richter und Robert Richter für deren Beiträge zur Arbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Sarah für Ihre unerschütterliche Liebe und Geduld sowie die stete Unterstützung, fortwährende Motivation und die inhaltlichen Anregungen, die maßgeblich zum Vollenden der Arbeit beigetragen haben.

Abschließend bin ich meinen Eltern, Gabriele und Konrad, zu tiefstem Dank verpflichtet für die Möglichkeit diesen Weg zu gehen, für Ihre Unterstützung, Ihr Verständnis und der Förderung während meines bisherigen Werdeganges. Ebenso danke ich meinen Brüdern, Mirko und Renato, die mir in meiner Jugend stets ein Vorbild waren.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	11
1.1 Motivation	11
1.2 Aufbau der Arbeit.....	12
2 Stand der Technik	14
2.1 Begrifflichkeiten und Normung der additiven Fertigung.....	14
2.2 Das selektive Elektronenstrahlschmelzen	14
2.2.1 Prozessbeschreibung.....	15
2.2.2 Einflussfaktoren auf die Bauteilfertigung beim EBM	19
2.2.3 Nachbearbeitung.....	27
2.3 Produktgestaltung im Kontext der additiven Fertigung	29
2.3.1 Potenziale bei der additiven Produktgestaltung für EBM	31
2.3.2 Leichtbau in der Produktentwicklung	34
2.3.3 Strukturoptimierung in Verbindung mit der additiven Fertigung	35
2.3.4 Modelldatenerzeugung und deren Umwandlung	38
2.4 Design for Additive Manufacturing	40
2.4.1 Gestaltungsregeln der pulverbettbasierten additiven Fertigung	41
2.4.2 Gestaltungsrichtlinien für EBM	41
2.4.3 Maß-, Form- und Lagetoleranzen.....	42
2.5 Potenzialbewertung und Kostenabschätzung	44
2.5.1 Potenzialbewertung der additiven Fertigung.....	45
2.5.2 Kostenkalkulation	46
2.6 Zusammenfassung zum Stand der Technik.....	47

3	Methode zur Bewertung des EBM als potenzielles Fertigungsverfahren	48
3.1	Potenzialabschätzung für das EBM	48
3.1.1	Verfahrenspotenziale des EBM	48
3.1.2	Verfahrenspotenzialbewertung des Anwenders	49
3.1.3	Randbedingungen aus dem Produktentwicklungsprozess.....	49
3.1.4	Berechnungen des Potenzials.....	50
3.1.5	Ergebnis, Handlungsempfehlungen und Validierung	52
3.2	Bewertung der Wirtschaftlichkeit des EBM.....	53
3.2.1	Bauzyklus- und Bauteilherstellungskosten	54
3.2.2	Ermittlung der maximalen Bauteilanzahl pro Bauzyklus	54
3.2.3	Material- und Fertigungskosten	56
4	Erarbeitung geometrischer Grenzen des EBM	59
4.1	Geltungsbereich der Gestaltungsempfehlungen.....	59
4.1.1	Ausgangswerkstoff.....	59
4.1.2	Anlagen- und Prozessparameter.....	60
4.2	Mess- und Auswertestrategien	61
4.3	Allgemeine Verfahrensgenauigkeit innerhalb der Anlage.....	62
4.3.1	Abweichungen innerhalb des Bauraums der Anlage A2X.....	64
4.3.2	Abweichungen innerhalb des Bauraums der Anlage Q20plus	68
4.3.3	Zwischenfazit	73
4.4	Minimal mögliche Strukturen beim EBM	76
4.4.1	Minimaler Zylinderdurchmesser mit Achswinkel 90° zur Bauebene	77
4.4.2	Minimaler Zylinderdurchmesser mit Achswinkel 45° zur Bauebene	78
4.4.3	Minimaler Zylinderdurchmesser mit Achswinkel 0° zur Bauebene	79
4.4.4	Minimaler Bohrungsdurchmesser mit Achswinkel 90° zur Bauebene	82
4.4.5	Minimaler Bohrungsdurchmesser mit Achswinkel 0° zur Bauebene	83
4.4.6	Minimale Wandstärke in Baurichtung	86
4.4.7	Minimaler Spaltabstand in Baurichtung	87

4.4.8	Winkeltreue an Downskin-Flächen	88
4.4.9	Minimale Wandstärke überhängender Strukturen.....	89
4.4.10	Zwischenfazit und -diskussion.....	91
4.5	Pulverentfernung	92
4.5.1	Versuchsauswertung zur Pulverentfernung.....	93
4.5.2	Maßhaltigkeit der Rohröffnungen des Demonstrators	94
4.6	Überhanguntersuchungen.....	96
4.6.1	Kritischer Überhangwinkel.....	96
4.6.2	Kritische freitragende Überhanglänge	97
4.6.3	Zwischenfazit und Diskussion	99
4.7	Einfluss der Stützstruktur auf die Bauteilqualität	100
4.8	Minimalmaß lasttragender Strukturen	104
4.8.1	Festigkeit schmaler Strukturen	104
4.8.2	Zwischenfazit und Diskussion	107
4.9	Gestaltungsempfehlungen für EBM.....	107
4.9.1	Geometrische Genauigkeit und Allgemeintoleranz des EBM.....	107
4.9.2	Konstruktionskatalog für das EBM	108
4.9.3	Diskussion und Implikation der Ergebnisse	110
5	Angewandte Strukturoptimierung	114
5.1	Main Gear Bracket (MGB)	115
5.1.1	Auslegungsgrundlagen	115
5.1.2	Strukturoptimierungsprozess.....	117
5.1.3	Festigkeitsnachweise	120
5.1.4	Fertigung.....	122
5.2	Formula Student Lenkstockhalter (FSL).....	123
5.3	Flight Crew Rest Compartment Bracket (FCRC).....	126
5.4	Zusammenfassung zur Strukturoptimierung	128
5.5	Beispielhafte Umsetzung der Kostenabschätzung.....	128
6	Zusammenfassung der Arbeit	131

7	Ausblick.....	134
8	Literaturverzeichnis.....	135
9	Abbildungsverzeichnis.....	161
10	Tabellenverzeichnis.....	167
	Anlagen.....	169

Abkürzungsverzeichnis

*.abf	Arcam Build File-Datei
AF	Additive Fertigung
AHP	Analytischer Hierarchieprozess
BE	Bauebene
BR	Begrenzungsraum
B-rep	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CSG	Constructive Solid Geometry
CT	Computer Tomografie
DF	Downskin-Fläche
DfAM	Design for Additive Manufacturing
DfX	Design for X
DIN	Deutsches Institut für Normung
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
FCRC	Flight Crew Rest Compartment
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FO	Focus Offset
HCF	High Cycle Fatigue / Dauerfestigkeit
HIP	Heißisostatisches Pressen
ISO	Internationale Organisation für Normung
KE	Konstruktionselement
LCF	Low Cycle Fatigue / Zeitfestigkeit
MAPS	Material-Anlagen-Prozessparameter-System
MGB	Main Gear Bracket
NC	Numerical Control, numerische Steuerung
PBF	Powder Bed Fusion, pulverbettbasiertes Schmelzen
PEP	Produktentwicklungsprozess
RBE	Rigid Body Elements
RE	Reverse Engineering
RTC	Rapid Technology Center
SEBM/EBM	(Selective) Electron Beam Melting, Elektronenstrahlschmelzen
SIMP	Solid-Isotropic-with-Penalization
SLBM/LBM	(Selective) Laser Beam Melting, Laserstrahlschmelzen
SLS/LS	(Selective) Laser Sintering, Selektives Lasersintern
STL, *.stl	Standard Tessellation Language, Stereolithografie-Datei
TF	Thickness-Function
Ti6Al4V	Titanlegierung mit ca. 6 Masse-% Aluminium und ca. 4 Masse-% Vanadium
TO	Topologieoptimierung
TRIZ	Theorie zur Lösung erfinderischer Probleme
UF	Upskin-Fläche
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WB	Wärmebehandlung

Symbolverzeichnis

F	.....	Gesamtheit aller äußeren Kräfte
K	.....	Steifigkeitsmatrix
\vec{v}	.....	Vektorielle Verschiebung
A	.....	Fläche der Schmelzschicht
A_F	.....	Summe aller nachzubearbeitenden Funktionsflächen
A_O	.....	Gesamtoberfläche
B_{BR}	.....	Breite des Begrenzungsraums
B_R	.....	Breite eines Rechtecks
BR_X	.....	Begrenzungsraum des Bauteils in X-Richtung
BR_Y	.....	Begrenzungsraum des Bauteils in Y-Richtung
C_L	.....	Lohnkostenpauschale bezogen auf die Zeit
C_m	.....	Materialkosten bezogen auf das Gewicht
CO_1	.....	1st Contour Offset, erster Konturlinienabstand
CO_2	.....	2nd Contour Offset, zweiter Konturlinienabstand
D	.....	Außendurchmesser
E_0	.....	Realer Elastizitätsmodul des Werkstoffes
E_S	.....	Energie im Schmelzpunkt
E_V	.....	Energie bezogen auf das Volumen
E_r	.....	Relativer Elastizitätsmodul des Werkstoffes
GGF	.....	Variable für den Grad der Gestaltungsfreiheit
GL	.....	Variable für den Leichtbaugrad
GME	.....	Variable für den Grad der Materialeffizienz
GP_{EBM}	.....	Variable für den Grad der genutzten Verfahrenspotenziale
H	.....	Höhe der Bauprozesses
H_{BR}	.....	Höhe des Begrenzungsraums
$H_{Bauraum}$	.....	Höhe des Bauraums
H_{Ebene}	.....	Höhe der Bauteile in einer Ebene
H_R	.....	Höhe eines Rechtecks
K	.....	Herstellkosten
K_{AE}	.....	Kosten zur Einrichtung der Anlage
K_{BP}	.....	Kosten für den Bauprozess
$K_{Energie}$	.....	Kosten für die Energienutzung pro Jahr
K_F	.....	Fertigungskosten
K_{Gas}	.....	Kosten für den Schutzgasverbrauch pro Stunde
K_{HeP}	.....	Kosten des Heliums während des Bauprozesses
K_{Invest}	.....	Anschaffungskosten
$K_{Invest Filter}$	.....	Kosten für Filter
$K_{Kathode}$	.....	Kosten der Kathode
K_L	.....	Lohnkosten
K_M	.....	Materialkosten
K_{NB}	.....	Kosten für die Nachbearbeitung
K_{QS}	.....	Kosten für die Qualitätssicherung
K_{Raum}	.....	Kosten für die Raumnutzung
$K_{Service}$	.....	Kosten für Wartung und Service pro Jahr
K_{VB}	.....	Kosten für die Prozessvorbereitung
$K_{VM sonst}$	.....	Kosten für sonstige Verbrauchsmittel pro Bauzyklus
L_{BR}	.....	Länge des Begrenzungsraums

L_R	.....	Länge eines Rechtecks
L_{scan}	.....	Scanlänge
LO	.....	Line Offset, Scanlinien-, Hatchabstand
$M.S.$	.....	Sicherheitsbeiwert, Margin of Safety
M_{HeK}	.....	Menge des Heliums zum Kühlen nach dem Bauprozess
M_{HeP}	.....	Menge des Heliums während des Bauprozesses
N	.....	Anzahl an Bauteilen
N_{Ebene}	.....	Anzahl an Bauteilen in der Bauebene
$N_{Ebene\ max}$	.....	Maximale Anzahl an Bauteilen in der Bauebene
$N_{Schicht}$	.....	Anzahl an Bauteilebenen innerhalb des Bauraums
N_{Ziel}	.....	Zu erzielende Anzahl an herzustellenden Bauteilen
N_{max}	.....	Maximale Anzahl an Bauteilen in einem Bauraum
P	.....	Strahlleistung
P_{Anlage}	.....	Dauer der Maschinennutzung pro Jahr
P_{EBM}	.....	Verfahrenspotenziale des EBM
PL_X	.....	Maß der Bauplattform in X-Richtung
PL_{Xa}	.....	Sicherheitsabstand der nutzbaren Bauplatte zum Bauplattenrand in X-Richtung
PL_Y	.....	Maß der Bauplattform in Y-Richtung
PL_{Ya}	.....	Sicherheitsabstand der nutzbaren Bauplatte zum Bauplattenrand in Y-Richtung
PL_a	.....	Abstand zum Bauplattformrand in einer bestimmten Richtung
R_a	.....	Arithmetischer Mittelwert der Rauheit einer Messstrecke
R_t	.....	Maximale Rautiefe einer Messstrecke
R_z	.....	Mittlere Rautiefe einer Messstrecke
R_m	.....	Zugfestigkeitsspannung
$R_{p0,2}$	.....	Streckgrenze bei 0,2 % Dehnung
\dot{S}	.....	Schmelzrate
S_a	.....	Mittenrauwert einer Messfläche
S_z	.....	Maximale Rautiefe einer Messfläche
Sh	.....	Länge der Supportstrukturen
SLa	.....	Abstand einzelner Supportstrukturen zueinander
T_B	.....	Summe aller Zeiten für die Pulverbeschichtung
T_D	.....	Summe aller Zeiten für prozess- und steuerungsbedingte Verzögerungen
T_L	.....	Arbeitszeit
T_S	.....	Summe aller Schmelz- oder Belichtungszeiten
T_{VA}	.....	Zeit zur Vakuumerzeugung und zum Aufheizen vor Baubeginn
T_b	.....	Dauer der Maschinennutzung pro Bauzyklus
V	.....	Bauteilvolumen
V_{add}	.....	Bauteilvolumen mit additiver Legierung
V_{konv}	.....	Bauteilvolumen mit konventioneller Legierung
$W_{GP_{EBM}}$	.....	Wichtungsfaktor des Grades der Verfahrenspotenziale
W_{GGF}	.....	Wichtungsfaktor des Grades der Gestaltungsfreiheit
W_{GL}	.....	Wichtungsfaktor des Leichtbaugrades
W_{GME}	.....	Wichtungsfaktor des Grades der Materialeffizienz
$W_{P_{EBM}}$	.....	Wert für das Gesamtpotenzial der Herstellung mittels EBM
X_i	.....	Indiziertes, finites Element beziehungsweise Pixel
a	.....	Rechtecklänge in horizontaler Richtung
b	.....	Rechtecklänge in vertikaler Richtung
d	.....	Innendurchmesser
g	.....	Abstand zwischen Bauteilen, Lücken- oder Spaltabstand
g_X	.....	Abstand zwischen Bauteilen in X-Richtung
g_{XY}	.....	Abstand zwischen Bauteilen in XY-Ebene
g_Y	.....	Abstand zwischen Bauteilen in Y-Richtung
g_Z	.....	Abstand zwischen Bauteilen oder der Bauplattform in Z-Richtung

k	.....	Anzahl an Rechteckreihen
k_e	.....	Endwert der Rechteckreihen
k_S	.....	Faktor zur Materialprozessierung aufgrund von Stützstrukturen
k_r	.....	Faktor zur Materialprozessierung des nicht rezyklierbaren Pulvers
l_{krit}	.....	Kritische Länge von freitragenden Überhängen
m_{add}	.....	Masse des Teils mit additiver Legierung
m_{konv}	.....	Masse des Teils mit konventioneller Legierung
\vec{n}	.....	Normalenvektor einer Fläche
n_k	.....	Anzahl an Rechtecken der Reihe k
r	.....	Nutzbarer Radius der Bauplattform
s_d	.....	Schichtdicke
t	.....	Dicke einer Struktur / Wandstärke
t_B	.....	Zeit für die Pulverbeschichtung pro Schicht
t_D	.....	Zeit für prozess- und steuerungsbedingte Verzögerungen pro Schicht
$t_{Kathode}$	.....	Lebensdauer der Kathode
$t_{Nutz\ Anlage}$	.....	Abschreibungsdauer der Anlage und Peripherie in Jahren
$t_{Nutz\ Filter}$	.....	Lebensdauer des Filters
t_V	.....	Zeit zum Vorheizen pro Schicht
v	.....	Strahlverfahrensgeschwindigkeit
γ	.....	Werkstofffaktor zur Ermittlung der äquivalenten Dauerfestigkeitsspannung
δ	.....	Downskin-Winkel, Überhangwinkel
δ_{krit}	.....	Kritischer Downskin-Winkel
ζ	.....	Strafexponent
ρ	.....	Dichte des Werkstoffes
ρ_0	.....	Reale Dichte des Werkstoffes
ρ_r	.....	Relative Dichte des Werkstoffes
σ_{HCFdyn}	.....	Dynamische Dauerfestigkeitsspannung
σ_{HCFeq}	.....	Äquivalente Dauerfestigkeitsspannung
$\sigma_{HCFstat}$	.....	Statische Dauerfestigkeitsspannung
σ_{HCFzul}	.....	Zulässige Dauerfestigkeitsspannung
σ_{LCFdyn}	.....	Dynamische Zeitfestigkeitsspannung
σ_{LCFeq}	.....	Äquivalente Zeitfestigkeitsspannung
σ_{LCFmax}	.....	Maximal auftretende Zeitfestigkeitsspannung
σ_{LCFmin}	.....	Minimal auftretende Zeitfestigkeitsspannung
$\sigma_{LCFstat}$	.....	Statische Zeitfestigkeitsspannung
σ_{add}	.....	Festigkeitsspannung der additiven Legierung
σ_{konv}	.....	Festigkeitsspannung der konventionellen Legierung
υ	.....	Upskin-Winkel

1 Einleitung

Die effiziente Entwicklung von Produkten und Lösungen ist seit Menschengedenken einer der wichtigsten Treiber zur Überwindung technologischer Hürden. In den vergangenen Jahrzehnten sind dabei mehrmals industrielle Höchstleistungen erzielt worden. Diese haben jeweils zu einem „[...] raschen Wandel von Produktionstechniken und, daraus abgeleitet, von wirtschaftlich-gesellschaftlichen Strukturen [...]“ (SGV 2009) geführt und lassen sich unter dem Begriff ‚industrielle Revolution‘ zusammenfassen. Im Zuge der angestrebten Individualisierung von Serienlösungen, der direkten Einbindung von Kundenwünschen und der Digitalisierung von Produktionstechnologien wird von einer vierten industriellen Revolution, auch bekannt als ‚Industrie 4.0‘, gesprochen (SGV 2017). Die additive Fertigung (AF) wird durch deren Überführung von der Musterherstellung hin zur direkten Endprodukteerzeugung mit Industrie 4.0 in Verbindung gebracht. Die additiven Herstellverfahren ermöglichen es, funktionale Produktstrukturen mit geforderten, anwendungsspezifischen Eigenschaften aus verschiedenen organischen und anorganischen Materialien direkt und nahezu werkzeuglos herzustellen (Wohlert und Gornet 2015).

1.1 Motivation

Eines der additiven Verfahren, welches zur Verarbeitung von metallischen, pulverförmigen Werkstoffen genutzt wird, ist das selektive Elektronenstrahlschmelzen ((Selective) Electron Beam Melting, SEBM/EBM). Aus Metallpulver entstehen mithilfe eines Elektronenstrahls als Energiequelle schichtweise endkonturnahe Bauteile. Dem EBM wird – ähnlich zu anderen additiven Verfahren – eine nahezu grenzenlose Gestaltungsfreiheit nachgesagt. Eine Vielzahl von Forschungsergebnissen hat allerdings gezeigt, dass dies für vergleichbare Prozesse wie dem selektiven Laserstrahlschmelzen ((Selective) Laser Beam Melting, SLBM/LBM) oder dem Lasersintern ((Selective) Laser Sintering, SLS/LS) nur bedingt zutrifft (Kranz 2017; Adam und Zimmer 2015; Lieneke et al. 2015). Es gibt prozessbedingte Abweichungen zwischen dem digitalen Modell, entwickelt mithilfe des Computer Aided Design (CAD), und dem produzierten Bauteil. Demzufolge werden Vorgaben benötigt, welche Arten von Strukturen, Genauigkeiten und Toleranzen möglich sind. Entsprechende verfahrensspezifische Gestaltungsrichtlinien besitzen hohe Relevanz für eine Anwendung der additiven Fertigung und sind zur vollen Potenzialausnutzung der

Technologie notwendig (Wohlers und Caffrey 2015; Bourell et al. 2014; Scott et al. 2012). Abbildung 1 stellt einige dieser Herausforderungen dar und zeigt, dass Gestaltungsrichtlinien sowie Normen und Standards zu den kritischen Erfolgsfaktoren der additiven Fertigung zählen (DAT 2016). Die Beachtung und Beeinflussung des Fertigungsprozesses sind dabei unumgänglich. Trotz eines Anstiegs an Publikationen zur additiven Fertigung ist die Anzahl derer speziell für das EBM vergleichsweise gering (Schmidt et al. 2017). Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Erarbeitung von Standards durch das Entwickeln von Konstruktionsrichtlinien und -empfehlungen speziell für das selektive Elektronenstrahlschmelzen leisten.

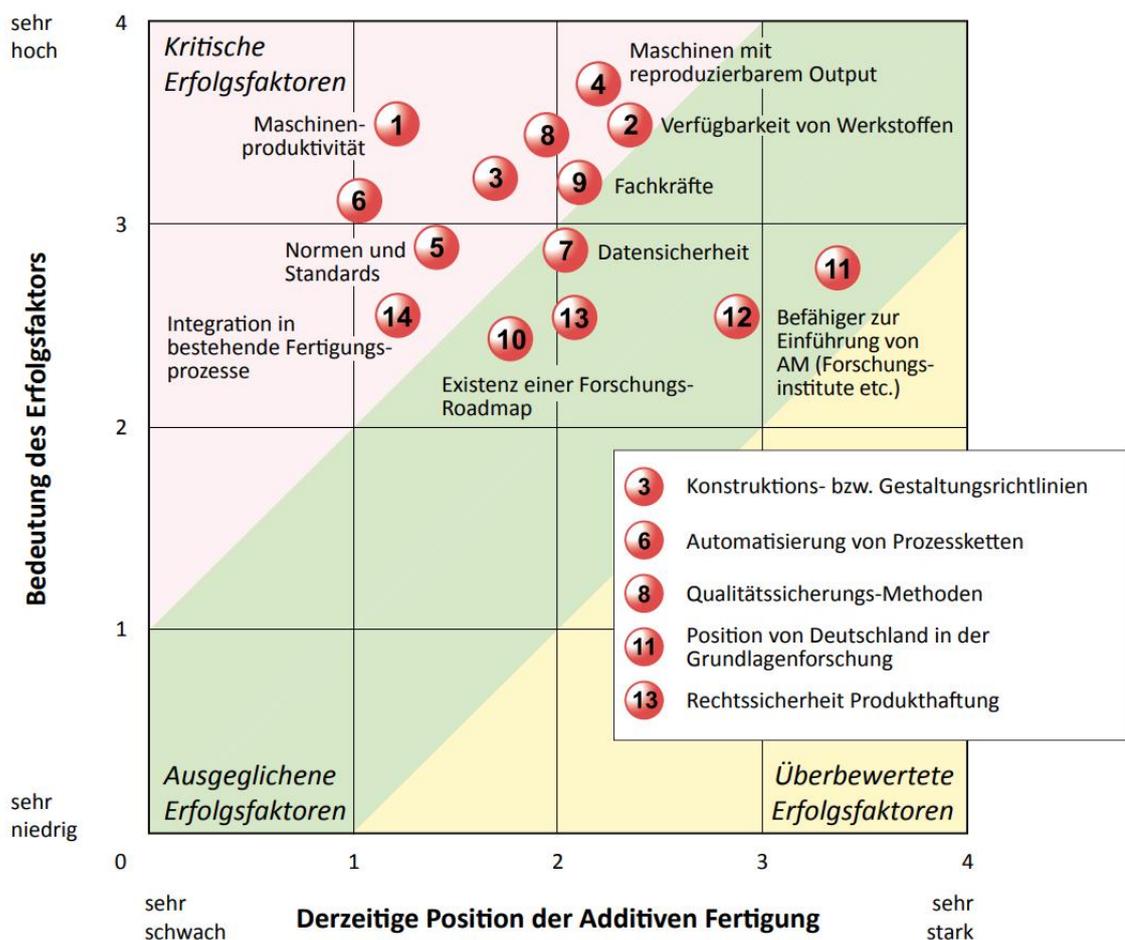


Abbildung 1 Herausforderungen und deren Relevanz bei der industriellen Einführung der additiven Fertigung (DAT 2016)

1.2 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 der Stand der Technik für die additive Fertigung allgemein und speziell für das EBM beschrieben. Darauf aufbauend werden die Konstruktionsmethodik sowie die Bedeutung von Gestaltungsrichtlinien für metalladditive Fertigungsverfahren vertieft. Den Abschluss des Kapitels bildet ein

Überblick zur wirtschaftlichen Bewertung der Anwendbarkeit und Kostenabschätzung additiver Verfahren.

In Kapitel 3 erfolgt die Konzeptentwicklung zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des EBM-Verfahrens. Dazu wird eine Methode erarbeitet, welche das Potenzial des EBM als anwendbares Fertigungsverfahren möglichst früh im Produktentwicklungsprozess und damit vor Ausarbeitung der Gestalt bewertet. Als Teil dieser Bewertung werden bestimmte Auswahlmöglichkeiten der Anwender sowie spezifische Technologiepotenziale quantifiziert. Die Berechnung der bauteilbezogenen Fertigungskosten in Abhängigkeit verschiedener zum Zeitpunkt der Produktentwicklung nutzbarer Auslegungsfaktoren vervollständigen die Methode. Die daraus resultierende Abschätzung des Potenzials und der Kosten erlaubt es, das EBM als mögliches Fertigungsverfahren einzuordnen, ohne explizite Gestaltinformationen im Rahmen der additiven Auslegung heranziehen zu müssen.

In Kapitel 4 wird eingangs der Geltungsbereich für die zu entwickelnden Konstruktionsempfehlungen festgelegt. Basierend darauf werden an ausgewählten Demonstratoren die Gestaltungsempfehlungen sowie relevante prozess- und geometriebedingte Zusammenhänge einzelner Geometrieelemente für das EBM erarbeitet, abgeleitet und in einem Konstruktionskatalog zusammengefasst.

Durch das Wissen zu herstellbaren Strukturen besteht die Möglichkeit, dass zur Verfügung stehende Material im Bauteil entsprechend so zu verteilen, dass es für die Anwendung optimal platziert ist. Das Potenzial rechnergestützter Strukturoptimierungen, auch bekannt als Topologieoptimierung (TO), lässt sich damit voll ausschöpfen. In Kapitel 5 werden an ausgewählten Anwendungsbeispielen die Nutzbarkeit der Strukturoptimierung, Fertigbarkeit der erzeugten Strukturen und der effiziente Datentransfer zwischen Modellierung, Berechnung und Fertigung untersucht.

Abschließend erfolgt die Zusammenfassung der gesamten Arbeit sowie ein Ausblick in den Kapiteln 6 und 7.

2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden Grundlagen zur additiven Fertigung allgemein und speziell zum Elektronenstrahlschmelzen erarbeitet und deren Bedeutung für den Produktentwicklungsprozess dargestellt.

2.1 Begrifflichkeiten und Normung der additiven Fertigung

Die additive Fertigung ist nach International Organization for Standardization (ISO), Europäischer Norm (EN) und dem Deutschen Institut für Normung (DIN) definiert als „[...] Prozess des Verbindens von Werkstoffen, um Bauteile aus 3-D-Modelldaten, im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsmethoden üblicherweise Schicht für Schicht, herzustellen.“ (DIN EN ISO/ASTM 52900). Neben der allgemeinen Begriffsdefinition sind alle weiteren im Zusammenhang mit der additiven Fertigung stehenden Bezeichnungen innerhalb der DIN EN ISO/ASTM 52900 definiert.

Darauf aufbauend ist die Normenreihe in den letzten Jahren um spezifische, verfahrensabhängige sowie ausgangswerkstoff- und nacharbeitsrelevante Standards erweitert worden. Als wichtiger Standard für die vorliegende Arbeit lässt sich die Norm zu Konstruktionsrichtlinien für laserbasierte Pulverbettfusion (DIN EN ISO 52911-1) hervorheben. Für das Elektronenstrahlschmelzen existiert aktuell kein Standard auf DIN-beziehungsweise ISO-Ebene. Einzig der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat die entsprechende Richtlinie VDI 3405, Blatt 3.5 entwickelt, welche den Titel „Konstruktionsempfehlung für das pulverbettbasierte Elektronen-Strahlschmelzen“ trägt (VDI 3405-3.5). Die vorliegende Arbeit bildet die Grundlage, auf welcher diese Richtlinie entstanden ist.

2.2 Das selektive Elektronenstrahlschmelzen

Das selektive Elektronenstrahlschmelzen gehört zu den pulverbettbasierenden Schmelzverfahren (PBF). Der Zusatz ‚selektiv‘ präzisiert den Schmelzprozess und ist in der patent- und markenrechtlich geschützten Abkürzung EBM inkludiert. Mittels eines Elektronenstrahls als Energiequelle erfolgt das punktuelle Aufschmelzen des leitfähigen Metallpulvers (Markl et al. 2017). Hersteller der EBM-Systeme, die in dieser Arbeit Anwendung finden, ist die schwedische Firma Arcam EBM. Es existieren ferner Systeme

von JEOL Ltd. und Forschungsanlagen, welche allerdings im Zuge der Arbeit nicht betrachtet werden (Sigl 2008; Zäh 2006).

Da in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Anlagen des Herstellers Arcam untersucht werden, wird der grundlegende EBM-Prozess und dessen Ablauf anhand dieser Anlagen erläutert. Aufgrund der Prozessführung ergeben sich spezielle Anwendungspotenziale des EBM, die abschließend aufgeführt sind.

2.2.1 Prozessbeschreibung

Im Folgenden werden der Aufbau einer EBM Anlage sowie der Ablauf eines Bauzyklusses beschrieben.

2.2.1.1 Allgemeiner Aufbau und Funktionsprinzip einer EBM-Anlage

Anlagen für das Elektronenstrahlschmelzen werden grundlegend in den Bereich der Elektronenstrahlsäule und den Arbeitsbereich, auch als Baukammer bezeichnet, unterteilt. Ersterer beinhaltet die Teilbereiche Strahlerzeugung und Strahlumformung. Die Bereiche sind in Abbildung 2 dargestellt. Zur Strahlerzeugung werden aus einer Wolfram- oder Lanthan-Glühkathode mithilfe von Emission Elektronen herausgelöst und in Richtung Anode beschleunigt (Schiller et al. 1977). Durch einen Wehneltzylinder als Steuerelektrode wird der Elektronenstrahl gebündelt sowie dessen Intensität und damit der Strahlstrom gesteuert. Bei Eintritt in den Bereich der Strahlumformung erfolgt eine Formkorrektur des Elektronenstrahls durch eine elektro-magnetische Astigmaterspule. Diese ist notwendig, da sonst der Strahl beim Auftreffen auf das Pulver eine elliptische Form annimmt (Schiller et al. 1977). Um den Strahl weiter zu fokussieren und damit die Leistungsdichte zu erhöhen, kommt eine von einem Eisenmantel umgebene Ringspule zum Einsatz. Als Analogie zur Lichtbrechung wird diese Spule auch als elektrooptische Linse bezeichnet. Bei Veränderung des Spulenstroms lässt sich die Distanz des Fokuspunktes beziehungsweise der Durchmesser des Auftreffpunktes variieren (Schultz 2000). Dieser als Fokus Offset (FO) bezeichnete Strom wird zur Strahlaufweitung und Bündelung variiert. Die Ablenkung des Strahls realisieren vier paarweise angeordnete Ablenkspulen. Das massenträgheitslose Scansystem ermöglicht die sprunghafte Ablenkung des Strahls auf dem Pulverbett, wodurch eine scheinbare Mehrstrahlenbelichtung erfolgt (Arcam EBM). Scannen oder Belichten beschreibt im Zusammenhang mit der additiven Fertigung den Prozess des Energieeintragens.

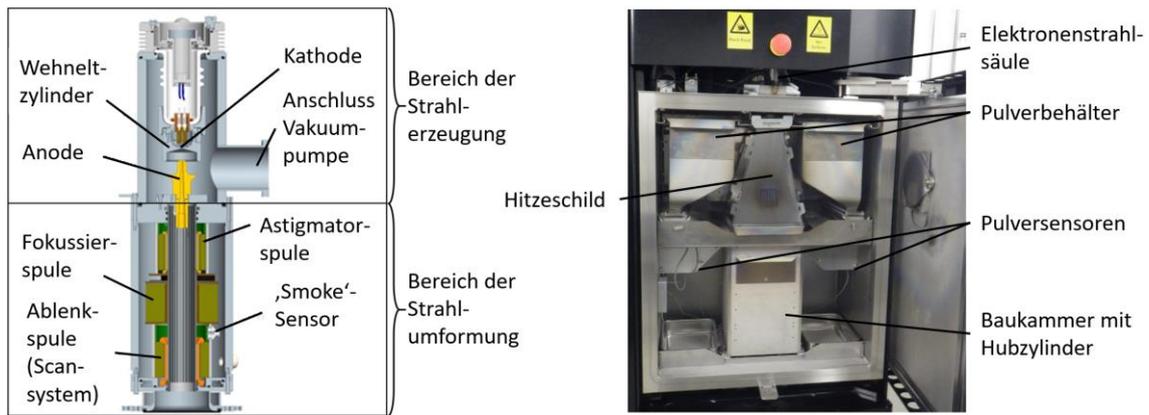


Abbildung 2 Aufbau einer Elektronenstrahlsäule (links) und des Arbeitsbereichs (rechts) einer Elektronenstrahlschmelzanlage

In der Baukammer trifft der Elektronenstrahl auf die Pulverschicht. Die Strahlelektronen kollidieren mit den freien Elektronen des Metallgitters und den Hüllelektronen der Gitteratome. Der Stoß erhöht in den meisten Fällen die thermische Schwingungsanregung der Atome, wodurch diese ihre ursprüngliche Gitterposition verlassen. Das Strahlelektron verliert dadurch nur einen geringen Teil seiner kinetischen Energie und kann somit noch weitere Elektronen anstoßen. Geschieht der Vorgang örtlich häufig genug, wird das Material an dieser Stelle aufgeschmolzen (Schultz 2000).

Das Funktionsprinzip, mit einer Energiequelle selektiv die Geometrie der Kontur einer jeweiligen Pulverschicht aufzuschmelzen, ist grundlegend identisch zu anderen PBF-Prozessen wie dem LBM. Allerdings führt die Nutzung eines Elektronenstrahls zu nachfolgend aufgeführten spezifischen zwei Verfahrenseigenheiten.

1. Der Prozess läuft unter Hochvakuum.

Zu Prozessbeginn wird die gesamte Anlage evakuiert, ein Vakuum von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ mbar erzeugt und im Betrieb unter geringer Zugabe von Helium auf ca. $2 \cdot 10^{-3}$ mbar gehalten (Arcam EBM; Körner 2016). Dies verhindert eine Kollision der Elektronen mit den vergleichbar schweren Luftmolekülen und damit eine Abschwächung des Strahls. Des Weiteren ist eine bessere Fokussierung des Strahls möglich und ein Überschlag von Kathode, Steuerelektrode und Anode lässt sich durch entfernte Trägermedien verhindern (Sigl 2008). Zudem werden Reaktionen des Metallpulvers mit Sauerstoff oder Stickstoff vermieden (Körner 2016).

2. Das Pulvermaterial wird vorgeheizt.

Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf das Pulver laden sich die einzelnen Pulverpartikel auf. Dadurch stoßen sich die Partikel untereinander ab. Die auftretenden Kräfte sind stark genug, um das Pulver aufzuwirbeln, was als Smoke-Event beschrieben

wird. Tritt dieses verstärkt auf, kann das Pulver in den Bereich der Strahlerzeugung geraten und das Filament beschädigen, wodurch der Prozess abbricht (Al-Bermani 2011). Um Smoke-Events zu verhindern und damit den Prozess stabil zu halten, wird das Pulver mithilfe des Elektronenstrahls vorgeheizt (Smith et al. 2016). Der Strahl fährt defokussiert die Pulverschicht mit hoher Geschwindigkeit ab und erhitzt die jeweilige Schicht auf eine bestimmte, legierungsabhängige Temperatur. Bei dieser beginnt das Sintern, welches das oberflächliche Zusammenwachsen von pulverförmigen Stoffen bei entsprechender Erwärmung darstellt (Zäh 2006; Hiersig 1995). Im Anfangsstadium des Sinterns bilden sich zwischen den einzelnen Pulverpartikeln erste Kontaktflächen aus, welche als Sinterhalse bezeichnet werden (Beiss 2013). Deren Bindung ist ausreichend, um ein Pulveraufwirbeln zu vermeiden und zugleich so gering, dass die Form der Pulverpartikel beim Trennen der Sinterbrücken unverändert bleibt. Neben der Notwendigkeit dieses Vorheizens für die Prozessstabilität wird die Differenz zwischen Schmelz- und Bauraumtemperatur und dadurch die Abkühlrate verringert. Ein Aushärten der Schmelzschicht mit minimalen Eigenspannungen im Bauteil ist die Folge (Hrabe et al. 2017; Edwards et al. 2013).

2.2.1.2 Allgemeiner Prozessablauf eines Bauzyklusses

Die zu fertigenden Geometrien sowie mögliche Stützstrukturen für einen Bauzyklus werden als Standard Tessellation Language (STL, *.stl) in das anlagenspezifische Programm eingeladen. Innerhalb dieses Programms sind Prozessthemen den jeweiligen STL-Modellen zuzuordnen. Jedem STL-Verbund können unterschiedliche Prozessthemen zugewiesen werden. Dies ist mitunter davon abhängig, ob die STL-Hüllen geschlossen erscheinen, was bei dicht zu fertigenden Bauteilen typisch ist, oder offen vorliegen wie beispielsweise bei Stützstrukturen. Danach erfolgt die Zerlegung der Geometrien in konstante Schichten mit definierter Schichtdicke. Jede entstehende Schichtkontur beinhaltet die in dem Programm errechneten Verfahrenswege des Strahls, welche typischerweise in Kontur- und Flächenfüllung unterteilt sind. Nach Abschluss der Datenvorbereitung wird aus diesem Programm eine maschinenproprietäre Arcam-Build-File (*.abf)-Datei geschrieben und in der Anlage eingelesen. Innerhalb dieser muss der Bauzyklus anhand einer Checkliste vorbereitet werden. Dazu zählen unter anderem eine Überprüfung aller installierten, demontierbaren Hardware und Sensoren sowie das Einlegen und Ausrichten der Bauplattform, auf welcher die Bauteile entstehen. Weiterhin sind das Bewegen des Hubzylinders auf Startposition unter Berücksichtigung bestimmter Wärmeausdehnung der Bauplatte, Kalibrierfahrt des Rakels und Auffüllen aller freien Räume innerhalb der Anlage mit losem Pulver bis auf Höhe der

Bauplattenoberseite durchzuführen (Al-Bermani 2011). Nach Abschluss der Vorbereitung und Schließen der Kammer beginnt der automatische Bauprozess.

Mit einem Raker wird eine bestimmte Schicht Pulver aufgetragen. Rakeln bezeichnet bei additiven Fertigungsverfahren das Auftragen des Materials bei jeder Schicht, was typischerweise mit einer Art Schieber, dem Raker, erfolgt. Der Elektronenstrahl heizt das aufgerakelte Pulver vor und schmilzt die zu verfestigende Bauteilkontur und -schicht auf. Nach Abschluss des Schmelzens erfolgt die Absenkung der Bauplattform um die eingestellte Höhe und die Auftragung der nächsten Pulverschicht. Dieser Prozess entsprechend Abbildung 3 wird bis zur Erreichung der Gesamthöhe wiederholt.

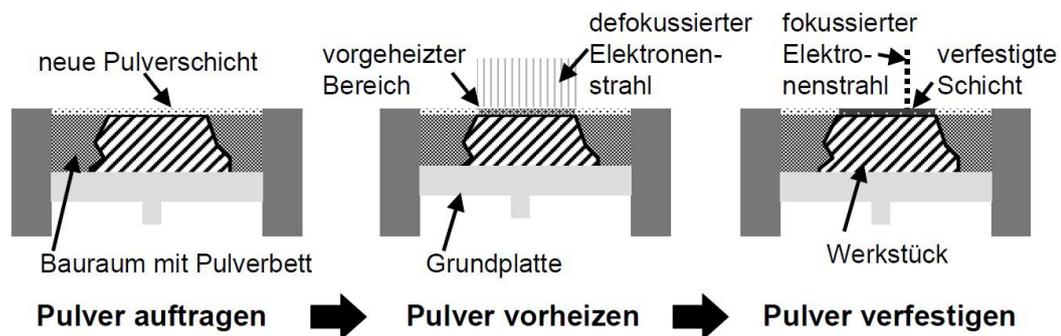


Abbildung 3 Ablauf eines Belichtungsschrittes einer Schicht beim Elektronenstrahlschmelzen (Sigl 2008)

Nachdem der Bauzyklus abgeschlossen ist, muss die Anlage unter anhaltendem Vakuum unter ca. 100°C abkühlen, um das Herausnehmen der Bauteile zu ermöglichen (Al-Bermani 2011). Zur Beschleunigung dieses Vorgangs lässt sich Helium einleiten. Ist eine handhabbare Temperatur erreicht, erfolgt die Öffnung der Anlage und das Absaugen des nicht versinterten Überschusspulvers. Der verbleibende, bauteilbeherbergende Pulverblock wird in ein Pulveraufbereitungssystem transportiert und das Restpulver mithilfe eines Strahlprozesses und Eigenpulver entfernt. Dieses wird gesiebt und nahezu vollständig zur erneuten Nutzung rezykliert (Al-Bermani 2011). Je nach Verbindungszustand der Bauteile mit der Grundplatte können bauteilabtrennende Nachbearbeitungsschritte wie das Funken- beziehungsweise Drahterodieren oder Sägen nötig sein. Das Abtrennen möglicher Stützstruktur bildet den Abschluss der mit EBM in Verbindung stehenden additiven Fertigung. Die gefertigten Teile liegen danach im Zustand ‚wie-gebaut‘ (‚as-built‘) vor (vgl. DIN EN ISO/ASTM 52900).

Verglichen mit der laserbasierten Bauteilgenerierung ergeben sich durch die Nutzung des Elektronenstrahls als Energiequelle die drei nachfolgend aufgeführten Vorteile (Lutzmann 2010).

1. Höherer Wirkungsgrad des Teilchenstrahls
2. 3 kW Leistungsaufnahme im Vergleich zu ca. 1 kW bei Laseranlagen

3. Trägheitslose Steuerung des Strahls

Eine Übersicht weiterer physikalisch-technischer Unterschiede verglichen mit dem selektiven Laserstrahlschmelzen ist in Tabelle 13 in Anlage A-1, S.170 dargestellt.

2.2.2 Einflussfaktoren auf die Bauteilfertigung beim EBM

Verschiedene Herstellparameter beeinflussen das Ergebnis der mittels EBM hergestellten Bauteilstrukturen. Aussagen zu Konstruktionsempfehlungen sind abhängig von der Technologie, dem Material, von der Anlage, den Prozessparameter sowie der Bauteilgestalt und -orientierung. Um den Geltungsbereich der Konstruktionsempfehlungen festzulegen, ist das Verständnis der möglichen Einflussfaktoren notwendig. Nachfolgend wird dazu speziell auf Gestalteinflüsse eingegangen, welche nicht direkt von der Modellgeometrie, sondern vorrangig vom Prozessablauf beeinflusst werden.

2.2.2.1 Digitale Prozesskette und deren Einfluss auf die Bauteilqualität

Zur Fertigung von Bauteilen mittels EBM liegen digitale Modelle zugrunde. Für die Anlagen ist nach aktuellem Stand ausschließlich das STL-Format nutzbar. Mithilfe von diskreten Dreiecken, welche mittels Koordinaten der Eckpunkte sowie dem Normalenvektor der Dreiecksfläche beschrieben sind, wird durch deren Aneinanderreihung der Verlauf einer Geometrie abgebildet (Ciobota 2012). Diese Beschreibungsform lässt sich aus unterschiedlichen Quellen wie beispielsweise von CAD-Modellen, Reverse Engineering, mathematischen Algorithmen oder Voxeldaten erzeugen (Kumar und Dutta 1997; Lorensen und Cline 1987). Die Beschreibungsart STL ist mit verschiedenen Problemen behaftet. Beispielhaft seien hierfür auflösungsabhängige Annäherungen an gekrümmte Flächen, Informationsverluste von Metadaten, Fehlstellen im Netzverbund durch Lücken, Verbindungsfehler sowie vertauschte Dreiecksnormalen oder Dreiecksüberschneidungen genannt (Kumar und Dutta 1997; Gebhardt 2016).

Auf Basis der Dreiecksbeschreibung erfolgt die digitale Bauvorbereitung. In Bezug auf das EBM wird zunächst das digitale Modell skaliert. Grund dafür ist die permanent erhöhte Temperatur innerhalb der Baukammer. Die erstarrte Struktur schwindet durch die Abkühlung auf Raumtemperatur. Die Skalierung erfolgt in der Regel mit entsprechenden Faktoren entlang der jeweiligen Raumachsen unabhängig der jeweiligen Geometrie. Werden Skalierungsfaktoren nicht oder mit falschen Werten eingesetzt, weichen Bauteildimensionen von den Sollmaßen ab.

Zur digitalen Vorbereitung des Bauzyklusses sind die Modelle im Bauraum auszurichten. Bei der Orientierung erfolgt eine rotatorische Manipulation des Bauteils um die entsprechenden Raum- oder Bauteilachsen. Die Positionierung hingegen beschreibt die translatorische Bewegung im Bauraum. Zur Beschreibung der Bauteillage im Bauraum einer EBM Anlage ist das Koordinatensystem einer generischen additiven Fertigungsmaschine für den aufwärts gerichteten Aufbau nutzbar, welches in Abbildung 4 dargestellt ist. Per Definition verläuft die X-Achse parallel zur Maschinenvorderseite. Die positive Z-Achse ist entlang der Aufbaurichtung orientiert. Senkrecht zu beiden verläuft die Y-Achse mit positiven Werten in Richtung der Anlagenrückseite (ISO/ASTM 52921).

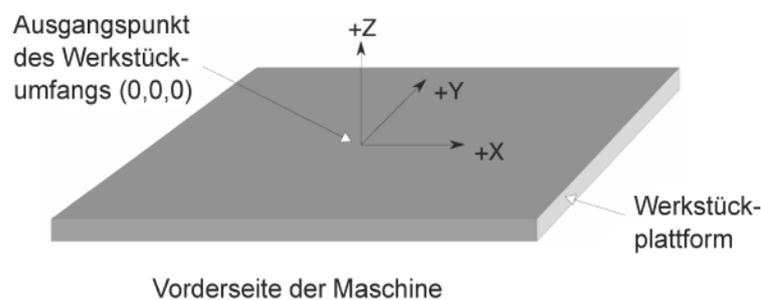


Abbildung 4 Maschinenkoordinatensystem (ISO/ASTM 52921)

Im Folgenden werden relevante Einflüsse der Orientierung und Positionierung von Bauteilen im Bauraum aufgeführt.

2.2.2.1.1 Orientierung von Geometrieelementen im Bauraum

Durch den schichtweisen Aufbau additiver Verfahren ist die Definition von Strukturen und Oberflächen in Abhängigkeit der Baurichtung typisch. Folglich erhalten Bereiche eines geometrisch identischen Körpers bei Änderung der Orientierung verschiedene Bezeichnungen. Eine mit Normalenvektor \vec{n} in negativer Z-Richtung zeigende Oberfläche wird als Downskin-Fläche (DF) mit dem entsprechenden Downskin-Winkel beziehungsweise Überhangwinkel δ beschrieben. Die Upskin-Fläche (UF) ist durch den Normalenvektor in Richtung der positiven Z-Achse bei einem Upskin-Winkel ν gekennzeichnet. Diese Winkelangaben beziehen sich jeweils auf die Bauebene (BE). Abbildung 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang (DIN EN ISO 52911-1; VDI 3405-3).

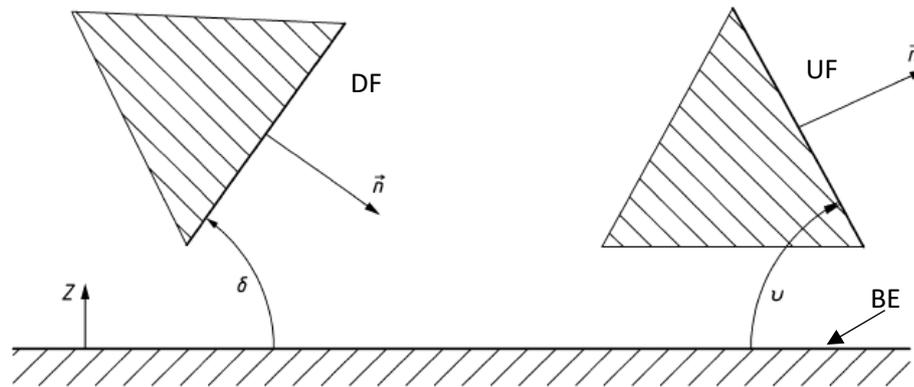


Abbildung 5 Beschreibung des Downskin- und Upskin-Winkels bei der additiven Fertigung (nach VDI 3405-3)

Darauf aufbauend sind unterschiedliche Strukturausprägungen charakterisierbar. Unterhalb eines bestimmten kritischen Downskin-Winkels δ_{krit} werden die Überhangstrukturen typischerweise mit Stützstrukturen gefertigt (Adam und Zimmer 2014). Bestimmte Strukturen erscheinen in Abhängigkeit der Orientierung inakkurat und sind nur mit Formfehlern oder generell nicht herstellbar. Folgende Erkenntnisse werden für das EBM in der Literatur genannt.

Zylinder mit einem Durchmesser von 1 mm, die achsparallel zur Bauebene gefertigt worden sind, weichen von deren kreisförmiger Form ab. Materialzugaben an der zur Bauplattform beziehungsweise negativen Z-Richtung zugeneigten Zylinderrundung verursachen dies. Zylinder erhalten dadurch eine elliptische Form (Suard 2015). Bei steigendem Durchmesser bleibt der Effekt erhalten, allerdings tritt dieser primär in den untersten Schichten des Zylinders auf, wodurch die Zylinderrundung in Richtung der Bauplattform spitz zuläuft. Die elliptische Form ändert sich zu einer Art umgekehrter Tropfenform (Rafi et al. 2012b; Persenot et al. 2018a). Dieses Auftreten ist unabhängig von der Orientierung entlang der X- oder der Y-Achse.

Weiterhin ist die Oberflächenrauheit von der Orientierung abhängig (Suard 2015). Je nach Ausrichtung und Anforderung an entsprechende Flächen werden Nachbearbeitungsaufmaße in Form von Materialzugaben empfohlen (VDI 3405-3; Thomas 2009).

Eigenspannungen, welche bei laserbasierten Prozessen auftreten und einen orientierungsabhängigen Einfluss besitzen, sind beim EBM Prozess aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Schmelzpunkt und der Umgebung vergleichsweise gering, wodurch große Schmelzflächen nicht vermieden werden müssen (Hrabe et al. 2017; Edwards et al. 2013; VDI 3405-3). Allerdings ist bei spontanem Anwachsen der zu schmelzenden Fläche ein Schrumpfen der ersten Schichten parallel zur Schmelzebene zu beobachten (Tounsi und Vignat 2017). Dadurch

treten Verformungen in den Randbereichen der untersten Bauteilschicht auf (Körner 2016).

Für das EBM sind vergleichsweise geringe Festigkeitsunterschiede verschiedener Belastungsrichtungen bekannt (Frazier 2014). Es existieren einerseits Untersuchungen, welche 2 % höhere Festigkeitswerte entlang der Z-Richtung zeigen (Hrabe und Quinn 2013b; Galarraga et al. 2016; Uçak 2018). Andererseits werden erhöhte Festigkeiten und Dehnungen von bis zu durchschnittlich 5 % bei Zugrichtung parallel zur XY-Ebene festgehalten (Rafi et al. 2012a; Edwards et al. 2013; Dehoff et al. 2016). Bei dünnwandigen Strukturen nimmt die Dehnung ab, wenn diese flach anstatt senkrecht zur Bauebene orientiert sind, was sich jedoch nicht signifikant in der Festigkeit widerspiegelt (Formanoir et al. 2016). Bezüglich des Dauerfestigkeitsverhaltens lassen sich Korrelationen zwischen dem Rissausbreitungsverhalten zur Gefügestrukturwicklung in Abhängigkeit der Orientierung im Bauraum beobachten (Galarraga et al. 2017a).

2.2.2.1.2 Positionierung von Geometrieelementen im Bauraum

Die Positionierung im Bauraum der EBM-Anlage hat Einfluss auf die Porenbildung. Poren bezeichnen im Kontext der additiven Fertigungsverfahren kleine Lunker oder Hohlräume im Bauteil. Die Porosität von 0,1 % am Rand der Baukammer und in Nähe der Bauplatte können bis hin zu 0,31 % in der Mitte der Baukammer und 120 mm Höhe variieren. Der Einfluss auf Kurzzeitfestigkeiten und den Elastizitätsmodul ist dennoch gering (Galarraga et al. 2016). Es sind verstärkt Poren bei Proben im Randbereich des Bauraums zu beobachten. Als Grund werden Pulveranhäufungen und folglich nicht verschmolzene Hohlräume genannt (Hrabe und Quinn 2013b). Andere Untersuchungen zeigen verstärkt Porosität um ca. 2 % im vorderen Bereich der Anlage, wohingegen die Unterschiede zwischen Baukammermitte und hinterem Bereich gering erscheinen (Uçak 2018). Bezüglich der Mikrostruktur sind Änderungen im Laufe der Bauhöhe bekannt. Demnach führt die Positionierung im unteren Bereich des Bauraums zu feinerem Gefüge. Proportional zur Bauhöhe nimmt die Korngröße zu. Als Grund hierfür werden höhere Abkühlraten zu Beginn eines Bauzyklusses genannt. Diese fallen bei zunehmender Bauhöhe geringer aus, da der Wärmespeicher wächst. Infolgedessen steigen die Härte und Festigkeit an Bauteilen im unteren Bereich des Bauraums (Sharma et al. 2018).

Durch die erhöhte Temperatur sind Maßabweichungen einzelner, verschieden positionierter Geometrien zueinander möglich. Die Positionierung von Bauteilen außerhalb der Bauraummitte führt zu Abweichung von ca. 2 mm in der Geometrie.

Zudem ist eine Art Versatz in den ersten Schichten bis zu einer Höhe von 8 mm möglich (Piaget et al. 2016).

2.2.2.1.3 Stützstruktur/Support

Ist die Skalierung, Orientierung, Vervielfältigung und Ausrichtung aller herzustellenden Teile des Bauzyklusses im Bauraum abgeschlossen, erfolgt die Stützstrukturerstellung. Dies geschieht parametergesteuert anhand der Orientierung der Oberflächen. Um Stützstrukturbereiche zu identifizieren, werden die Dreiecksflächenwinkel des STL-Netzes untersucht. Bei Unterschreiten des festgelegten kritischen Überhangwinkels gilt die Fläche als zu stützend. Supports sind bei pulverbettbasierten Verfahren konstruktiv typischerweise als einzelne schmale Wände ausgeführt. Diese werden zumeist über einzelne Pins oder Zähne an der Bauteiloberfläche angebunden, um deren Ablösung vom Bauteil zu vereinfachen. Auf Basis bestimmter Grundformen entsprechend Abbildung 6 lassen sich die schmalen Konturen verzweigen, um die Überhangfläche ausreichend abzustützen. Zur Beeinflussung der Supporterstellung stehen zahlreiche Parameter zur Verfügung. Die Wahl der Parameter hat Auswirkungen auf die Herstellbarkeit des Supports, der zu stützenden Fläche und darauffolgender Struktur. Eine optimale Auswahl der Stützstruktur ist angestrebt, da deren Entfernung in der Regel händisch durchzuführen und dadurch zeitaufwendig ist (Spiering et al. 2018).

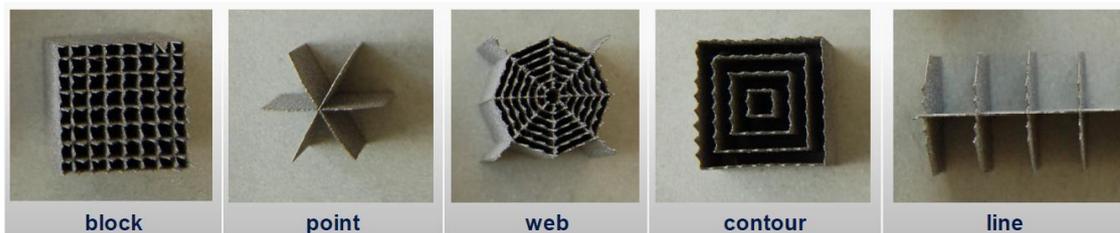


Abbildung 6 Standardformen von Stützstrukturen für die metalladditive Fertigung (Krol et al. 2012)

Supports haben im Zuge des EBM in erster Linie die Aufgabe Wärme aus der Schmelzzone abzuleiten. Grundlegend führt eine unzureichende Wärmeabfuhr aufgrund von fehlenden oder zu wenig Stützstrukturen zu signifikanten Formfehlern (Tounsi und Vignat 2017). Dennoch können speziell schmale Bauteilstrukturen mittels EBM verformungsfrei ohne Support hergestellt werden (Fiaz 2016). Es existieren ferner Untersuchungen die Wärmeabfuhr beispielsweise in Form eines Spaltes mit vereinzelt wenigen Verbindungen zum Bauteil zu realisieren (Cheng und Chou 2017; Chou und Cooper 2015; Tounsi und Vignat 2017). Die Gestaltung von Stützstrukturen beim EBM ist aufgrund der Prozessführung bei erhöhter Temperatur weniger restriktiv, da keine Eigenspannungen zu erwarten sind, wie in Abschnitt 2.2.2.1.1 beschrieben. Da das angesinterte Pulver selbst eine Stützwirkung besitzt, können Strukturen mit geringem

Energieeintrag, zu denen beispielsweise Stützstrukturen zählen, ohne darunterliegende Anbindung an Bauteilstruktur oder die Bauplatte direkt ins Pulverbett gefertigt werden.

2.2.2.2 Ausgangspulver, Pulverschicht und Legierungszusammensetzung

Das Ausgangsmaterial für das EBM ist typischerweise sphärisches Metallpulver, welches durch pulvermetallurgische Prozesse wie Gasverdüsung hergestellt wird (Beiss 2013). Die Legierungszusammensetzung und die Qualität des Pulvers haben Auswirkungen auf die Prozessierbarkeit und bestimmte Materialeigenschaften wie Dichte und Mikrostruktur. Für das EBM kann typischerweise eine Korngröße von ca. 45 - 105 μm genutzt werden. Sehr kleine Partikel sind in der Regel nicht verarbeitbar, da diese durch die statische Aufladung während des Prozesses Pulverstäube verursachen (Kahnert 2014; Sigl 2008). Durch Anpassung der Prozessparameter ist die Nutzung von Pulver im Bereich 25 - 45 μm möglich (Karlsson Algardh et al. 2016). Die Größe der Pulverkörner beeinflusst maßgeblich die Oberflächenbeschaffenheit und -rauheit. Durch Nutzung großer Pulverkörner wird die Kontur von Wandungen weniger genau abgebildet (Attar 2011). Zudem können Porositäten des Ausgangsmaterials durch die Fertigung ins Bauteil übertragen werden. Der Verdüsungsprozess führt zu Gaseinschlüssen in einzelnen Pulverkörnern, welche trotz des Vakuums im Prozess nicht entweichen können (Hrabe und Quinn 2013b). Erkennbar sind diese typischerweise durch die sphärische Form, wohingegen prozessbedingte Poren beispielsweise durch unzureichendes Schmelzen wenig sphärisch erscheinen (Muzangaza 2018).

Die Höhe einzelner Pulverschichten jedes Rakelvorgangs beeinflussen direkt die Dauer eines Bauzyklusses. Je größer die Schichtdicke bei gleichbleibender Verfahrensgeschwindigkeit gewählt werden kann, desto schneller verläuft die Fertigung. Durch die schichtweise Fertigung ist der Treppenstufeneffekt sichtbar. Dieser tritt durch die Zerlegung von un stetigen und schräg orientierten Konturen in einzelnen Schichten auf, wie in Abbildung 7a dargestellt (VDI 3405-3). Die Schichtdicke kann zudem die Beschaffenheit der Oberfläche hinsichtlich Rauheit sowie Welligkeit beeinflussen. Hohe Schichtdicken führen zu unebeneren Oberflächen (Markl und Körner 2016). In Abbildung 7b ist dies an der Oberfläche eines EBM-Bauteils dargestellt. Für weiterführende Zusammenhänge des Pulvereinflusses auf die additive Fertigung im Allgemeinen sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Vock et al. 2019).

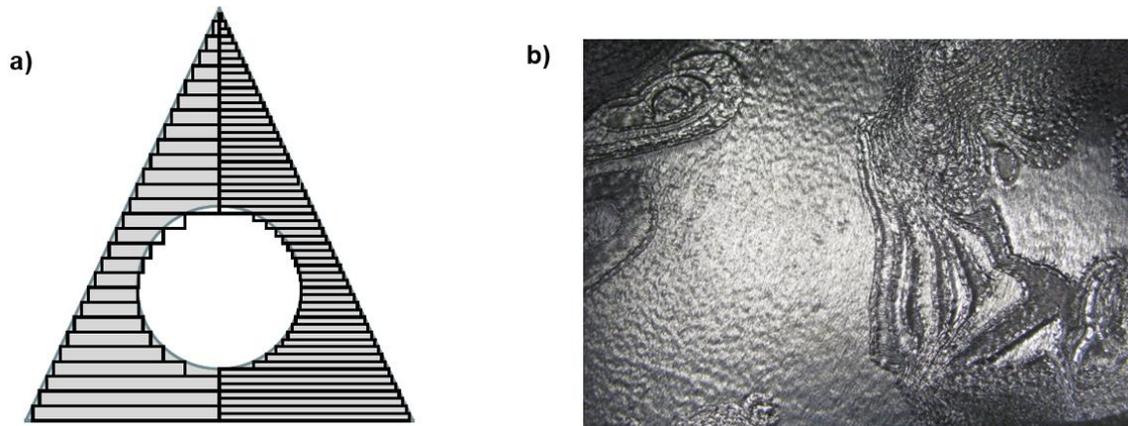


Abbildung 7 Schematische Darstellung des a) Treppenstufeneffekts und b) der daraus resultierenden, sichtbaren Oberflächenstrukturierung beim EBM (VDI 3405-3)

2.2.2.3 Anlage & Prozessführung

Die Prozessführung beim EBM sowie die folglich beschriebenen Schmelzstrategien haben direkt Einfluss auf die Gestalt und die Bauteileigenschaften. Grundsätzlich lässt sich die eingekoppelte Energie im Schmelzpunkt E_S nach Gleichung (2.1) ermitteln (Suard 2015).

$$E_S = \frac{P \cdot L_{scan}}{v} \quad (2.1)$$

Darin beschreibt P die Leistung des Strahls, welche sich aus der Beschleunigungsspannung multipliziert mit dem Strahlstrom ergibt. Durch die konstante Beschleunigungsspannung von 60 kV ist die Strahlleistung allein vom applizierten Strahlstrom abhängig (Tammis-Williams et al. 2015). L_{scan} beschreibt die Länge der Scanlinie und v die Strahlverfahrgeschwindigkeit. Unter Einbezug des aufzuschmelzenden Volumens kann die Volumenenergie E_V nach Gleichung (2.2) aus der Schichtdicke s_d und der aufzuschmelzenden Fläche A ermittelt werden. Diese Fläche ergibt sich aus der Länge der Scanlinie und dem Scanlinien- beziehungsweise Hatchabstand, welcher beim EBM als Line Offset LO beschrieben ist. Die Strahlverfahrparameter lassen sich zur Schmelzrate \dot{S} zusammenfassen. Die entsprechenden Parameter sind direkt oder in bestimmten Grenzen einstellbar.

$$E_V = \frac{E_S}{A \cdot s_d} = \frac{P \cdot L_{scan}}{v \cdot L_{scan} \cdot LO \cdot s_d} = \frac{P}{\dot{S}} \quad (2.2)$$

Neben allgemeinen Prozesssteuerparametern wie die Vorheiztemperatur zu Prozessstart und der Druck des Vakuums, werden einzelne Abläufe des Aufschmelzens der Geometrien und entsprechende Parametersätze beim EBM in sogenannten Prozessthemen zusammengefasst. Die grundlegenden Prozessthemen sind nachfolgend beschrieben (Suard 2015).

- ‚Preheat‘:
Das Prozessthema findet beim Vorheizen der Baukammer vor jeder Schicht Anwendung. Unterschieden wird dabei in Preheat 1 zur Vorheizung der gesamten Baufläche und Preheat 2, welches die jeweiligen Schmelzflächen mit einem bestimmten Offset vorheizt. Ferner lässt sich ein Zwischenheizen hinzufügen, um zusätzlich zum Vorheizen die Oberflächentemperatur zu beeinflussen.
- ‚Melt‘:
Dieses Prozessthema dient typischerweise dem Aufschmelzen von Bauteilgeometrien. Dabei wird in Kontur- und Flächenschmelzen unterschieden.
- ‚Wafer‘:
Stütz- oder Supportstrukturen werden typischerweise mit diesem Prozessthema belichtet.

Jedem STL-Verbund lassen sich ein oder mehrere Prozessthemen zuordnen. Anlagenabhängig sind zudem ‚Net‘- und ‚Point-Net‘-Themen zur Belichtung schmaler Geometrien möglich. Bei der zu schmelzenden Schicht lassen sich einzelne Scanpfadparameter festlegen. In Abbildung 8 sind diese Belichtungsstrategien dargestellt (Suard 2015).

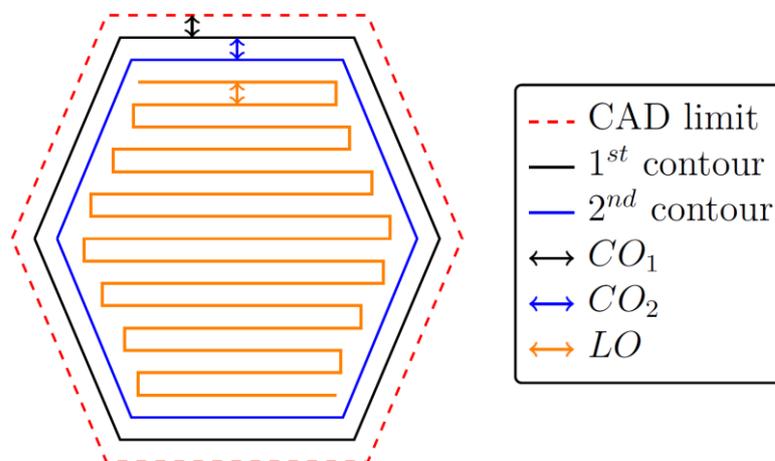


Abbildung 8 Scanlinienbeschreibung beim EBM (Suard 2015)

Die erste Konturlinie und deren Abstand, bezeichnet als Contour Offset 1 CO_1 bildet die CAD-Hülle beziehungsweise beschreibt den Abstand zu dieser. Darauf folgt eine zweite Konturlinie und deren Abstand Contour Offset 2 CO_2 . Bei Bedarf kann das Konturschmelzen auf Basis der Parameter der zweiten Konturlinie beliebig oft wiederholt werden. Die Flächenfüllung erfolgt mit dem Scanlinienabstand LO . Innerhalb des Melt-Themas besteht die Möglichkeit, zwischen ausschließlichem Konturlinien- oder Flächenschmelzen sowie deren Kombination auszuwählen und deren Reihenfolge

festzulegen. Konturlinien werden in Ergänzung zur Flächenfüllung genutzt, um die Oberflächenqualität zu erhöhen (Smith et al. 2016). Die Scanrichtung der Flächenfüllung ändert sich in jeder Schicht. Je nach Anlagen- und Softwaregeneration rotiert diese um 90° oder wird automatisch auf Basis der schnellstmöglichen Flächenfüllung von Schicht zu Schicht errechnet.

Zusätzlich zu den Strahlparametern lassen sich Beziehungen einzelner Schmelzpfade zueinander wie Überlappungen, Sprunghäufigkeit der Schmelzpunkte, mäanderförmige Belichtung, Reihenfolge der Belichtungsstrategien oder Anzahl an multiplen Strahlen festlegen. Neben direkt beeinflussbaren Parametern wird die Anlagensteuerung über Angabe von Bereichs- oder Maximalwerten geregelt. Dabei kann nicht direkt auf die im Prozess genutzten Parameter Einfluss genommen werden, sondern ausschließlich auf deren Grenzwerte. Ferner kommen faktorengesteuerte Funktionen zum Einsatz, die Einfluss auf die Strahlenergie in Abhängigkeit der Scanstrategie bei unterschiedlichen Prozessthemen haben, wie die Thickness-, Turning-Point- oder Speed-Function. Zu deren Beschreibung sei auf weiterführende Literatur verwiesen (Smith et al. 2016). Tabelle 16 in Anlage A-3, S. 173 fasst eine Auswahl an Prozessparameterstudien zusammen und zeigt Auswirkungen auf die verschiedenen Bauteileigenschaften.

2.2.2.4 Zusammenfassung der Einflussfaktoren

Die Einflüsse auf das Ergebnis des EBM-Prozesses sind folglich von vielen Parametern abhängig. Eine Betrachtung der zugrundeliegenden Gegebenheiten ist essenziell, um den Geltungsraum der Konstruktionsrichtlinien darzustellen. Zur ganzheitlichen Darstellung mehrerer Prozessgrößen auf ein Ergebnis oder Problem sind Ursache-Wirkungs-Diagramme heranziehbar (Schmidt 2014). Diese wurden bereits für pulverbettbasierte Prozesse allgemein und in Ansätzen für EBM entwickelt (Meindl 2005; Rehme 2010; Lieneke et al. 2015; Sigl 2008; Kahnert 2014). In Abbildung 64 in Anlage 0, S. 179 ist das Ursache-Wirkungs-Diagramm dargestellt, welches speziell auf das in der vorliegenden Arbeit genutzte EBM-Verfahren zutrifft. Darin sind ausschließlich die Prozesse enthalten, welche bis zum Abschluss der Bauteilgenerierung mittels EBM einwirken. Die Betrachtung der Einflüsse nach der Bauteilgenerierung wird im Weiteren dargestellt.

2.2.3 Nachbearbeitung

Bestimmte Eigenschaften, welche sich aus dem Werkstoff sowie der Fertigungstechnologie ergeben, lassen sich nachträglich durch entsprechende Verfahren ändern. Dies wird dann notwendig, wenn anwendungsbezogen die additive erzeugten Material- oder Geometrieigenschaften nicht ausreichen. Grundlegend lässt

sich hierbei zwischen Beeinflussung von Werkstoff- oder Materialeigenschaften und der geometrischen Erscheinung unterscheiden. Dementsprechend können thermische, chemische oder mechanische Prozesse genutzt werden. Die relevanten Nachbearbeitungsverfahren und deren Einfluss für EBM und speziell für die Titanlegierung Ti6Al4V sind nachfolgend beschrieben.

2.2.3.1 Thermische Nachbearbeitung

Isolierte thermische Nachbehandlungen wie beispielsweise das Spannungsarmglühen, welches beim LBM zur Verringerung der Anisotropie und Eigenspannungen eingesetzt wird, hat keinen signifikanten Einfluss auf das EBM (Formanoir et al. 2016; Shui et al. 2016). Das Gefüge lässt sich mittels Manipulation des Abkühlprozesses beeinflussen. Durch eine beschleunigte Abkühlrate ist ein feineres Gefüge erreichbar, wodurch 31 % höhere Zugfestigkeiten bei 81 % geringerer Duktilität erzielbar sind (Galarraga et al. 2017b). Wärmebehandlung mit zusätzlicher Druckbeaufschlagung, was als heißisostatisches Pressen (HIP) bezeichnet wird, hat Auswirkungen auf die Materialeigenschaften. Ziel des HIP ist die nachträgliche Verdichtung des Körpers sowie die Einstellung isotroper Werkstoffeigenschaften (Timmerhaus und Barber 1979). Steigerung der Dichte bei Bauteilen von 99,3 % auf 99,8 % sind möglich (Shui et al. 2016). Pulvergasporen (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) lassen sich trotz des darin enthaltenen Argons weitgehend schließen. Ferner ist beim EBM die Verdichtung von fertigungsbedingten Poren möglich, da diese evakuiert vorliegen. Bezogen auf die Festigkeitseigenschaften lässt sich bei entsprechender Vermeidung von äußeren, oberflächenbedingten Rissen die Dauerfestigkeit mittels HIP anheben. Allerdings hat HIP keinen steigernden Einfluss auf die Zugfestigkeiten (Al-Bermani 2011). Die jeweiligen HIP-Parameter für die optimale Ergebniserzielung sind anzupassen. Die Durchführung nach Normparameter bei EBM-Bauteilen führt zu negativen Änderungen der Materialparameter und ist somit nicht zu empfehlen (Ackelid und Bahbou 2016). Ohne entsprechende Oberflächenglättung hat HIP wenig bis keinen vorteilhaften Einfluss auf die Erhöhung der Dauerfestigkeit, da Dauerfestigkeitsversagen vorrangig von Oberflächenkerben ausgehen und nicht von inneren Poren (Kahlin et al. 2017).

2.2.3.2 Nachbearbeitung der Oberfläche

Die Nachbearbeitung der Oberfläche wird unter anderem zur Einstellung von Form- und Lagetoleranz oder zur Erzielung bestimmter Oberflächen- und Bauteileigenschaften durchgeführt. Durch die maschinelle Bearbeitung der Oberfläche lässt sich beispielsweise die Kurzzeitfestigkeit um bis zu 11 % erhöhen (Rafi et al. 2012a). Zur Erzielung einer glatten Fläche ohne Vertiefungen ausgehend vom Zustand wie-gebaut, müssen mehr als 250 µm pro Oberfläche abgetragen werden. Dies verringert zudem die

Rauheit um 90 %. 150 µm Abtrag sind für eine glatte Oberfläche ausreichend (Natal et al. 2018). Eingeschlossene Poren können durch die mechanische Nachbearbeitung freigelegt werden (Muzangaza 2018). Wenngleich filigrane Strukturen herstellbar sind, ist deren Nachbearbeitung herausfordernd. Bei Strukturen mit einer Wandstärke < 1,5 mm führt die spanende Bearbeitung trotz verschiedener Frässtrategien zu Abweichungen sowie Frässpuren auf der Oberfläche. Als Grund dafür wird die Nachgiebigkeit der dünnen Strukturen beschrieben. Entsprechende Versteifungen sind empfohlen (Alexander et al. 2016).

Verschiedene Strahlprozesse lassen sich anwenden, um die Oberflächenrauheit ca. 50 % zu verringern und dadurch die Dauerfestigkeit zu steigern. Diese Prozesse erzeugen zudem Druckeigenspannungen an der Oberfläche (Soyama und Okura 2018; Sato et al. 2016). Chemische oder elektrochemische Verfahren sind ebenfalls zur Bauteileigenschaftsänderung nutzbar. Durch Ätzen lässt sich die Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der im Prozess erzeugten Rauheit um 40 % - 70 % reduzieren (Lhuissier et al. 2016; Persenot et al. 2018b; Sun 2016). Elektrochemisches Polieren erzielt Rauheitsverringern von ca. 85 %. Zudem werden die typischerweise spitzen Rautiefen verrundet (Natal et al. 2018).

Durch jedes der Oberflächenbearbeitungsverfahren erfolgt eine Materialabtragung. Die Abtragshöhe ist abhängig vom Verfahren, der Einwirkdauer sowie der anfänglichen Rauheit und Oberflächenbeschaffenheit. Ein entsprechendes Aufmaß sollte im Konstruktionsprozess berücksichtigt werden.

2.3 Produktgestaltung im Kontext der additiven Fertigung

Der Begriff Produktgestaltung umfasst die werkstofftechnische und geometrische Festlegung von Baugruppen und Komponenten (Feldhusen und Grote 2013). Diese ist Teil des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses im Zuge der Produktentwicklung, welcher im Allgemeinen die Arbeitsschritte zur Lösungsfindung einer komplexen Aufgabe im Sinne des Produktentstehungsprozesses (PEP) beschreibt. Neben wirtschaftlichen und unternehmensbezogenen Einflüssen stellen Funktionen zur Erfüllung der technischen Aufgabe den Hauptbestandteil der Gestaltentwicklung dar und sind für jede Art von Konstruktionsstrategie zu berücksichtigen. Aus einer Vielzahl unterschiedlicher Methodiken zur Entwicklung und Konstruktion von Produkten ist die Herangehensweise zur praxisorientierten Lösungsfindung entstanden (VDI 2222-1). Die darin enthaltenen sieben Schritte sind allgemein entlang der vier Hauptphasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten zu durchlaufen. Wenngleich eine

allgemeingültige Herangehensweise in der VDI 2222 dokumentiert ist, wurden speziell für die additive Fertigung angepasste Vorgehensmodelle entwickelt (Kranz 2017; Kumke 2018; Künneke et al. 2018). In Abbildung 65 in Anlage A-5, S. 180 ist eines dieser Modelle dargestellt (nach Kumke 2018). Im Gegensatz zur allgemein gültigen Herangehensweise umfasst die Phase III zugleich das Entwerfen und Ausarbeiten. Die Gestalt wird darin iterativ entwickelt. Die Nutzung rechnergestützter Programme ermöglicht ein Kombinieren der Phasen Entwerfen und Ausarbeiten (Feldhusen und Grote 2013).

Im Zuge dieser Methodik sind zahlreiche, allgemein nutzbare Konstruktionsmethoden und Hilfsmittel zur Umsetzung entwickelt worden (Ehrlenspiel und Meerkamm 2013; Ehrlenspiel et al. 2014; Feldhusen und Grote 2013). Daraus lassen sich relevante Hilfsmittel speziell für die additive Fertigung extrahieren. In Abbildung 9 sind diese Methoden aufgeführt und deren Anwendung innerhalb der Phasen II und III der Konstruktionsmethodik eingeordnet. Die vorangegangene Phase I dient der Informationsbeschaffung. Die Phase II ist ausschlaggebend dafür, ob eine additive Fertigung durch den nachfolgenden Entscheidungsknoten anzustreben ist. Die Methoden der Phase II sind als funktionserweiternde Hilfsmittel beschrieben, da diese den Lösungsraum einer möglichen additiven Konstruktion aufspannen. In deren Kern stehen die Funktionen und Potenziale einer additiven Gestalt im Vordergrund und werden hinsichtlich des Produktnutzens analysiert. Für eine detailliertere Beschreibung der in Abbildung 9 dargestellten allgemeinen Konstruktionsmethoden wie Design for X (DfX) und die Theorie zur Lösung erfinderischer Probleme (TRIZ) sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Feldhusen und Grote 2013; Ehrlenspiel und Meerkamm 2013; in Anlehnung an Kumke 2018). Fällt die Entscheidung für eine additive Fertigung, beschreibt die Phase III des Vorgehensmodells die restriktiven Hilfsmittel. In Abhängigkeit der entsprechenden Prozessauswahl werden in dieser Phase konkrete Konstruktionen entwickelt. Die verfahrensspezifischen Methoden für die allgemeine additive Fertigung wie die Potenziale des additiven Verfahrens, der Einsatz der Topologieoptimierung sowie das ‚Design for Additive Manufacturing‘ (DfAM) werden nachfolgend im Kontext des EBM dargestellt.

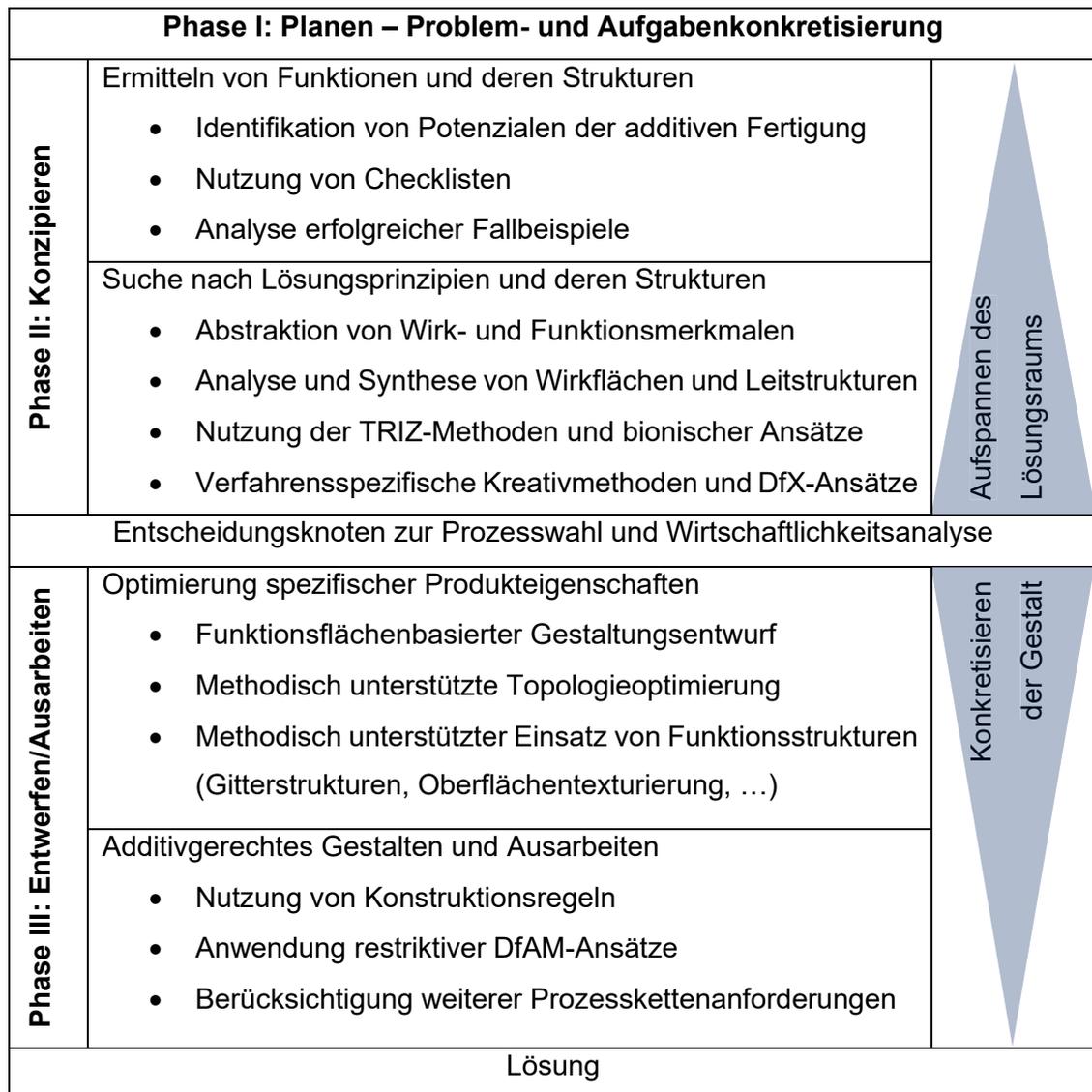


Abbildung 9 Methodeneinordnung in die Konstruktionsmethodik für die additive Fertigung (Eigene Darstellung in Anlehnung an Kumke 2018; VDI 2222-1)

2.3.1 Potenziale bei der additiven Produktgestaltung für EBM

Der additiven Fertigung allgemein und den damit gefertigten Bauteilen werden vorrangig hohe umsetzbare Komplexität hinsichtlich Form, Material, Funktion und Hierarchie nachgesagt (Gibson et al. 2014). Im Folgenden sind Praxisbeispiele speziell für das EBM beschrieben, um die prozessspezifischen Potenziale darzustellen.

Auf Basis der Analyse und Synthese von Wirkflächen (vgl. Abbildung 9) kann sich allein die Zusammenführung von komplexen, als Baugruppe ausgeführten Teilen als wirtschaftlich sinnvoll erweisen. Zur effizienten Konsolidierung ist bereits das Überlappen der Modelldaten zum Verbinden bestehender Bauteile innerhalb des EBM-Prozesses ausreichend (Wang et al. 2019, 2018b). Die daraus resultierenden, großen Bauteile lassen sich verglichen mit laserbasierten PBF-Prozessen dreimal schneller

mittels EBM herstellen (Zhong et al. 2017; Thompson et al. 2016). Die Erzeugung von funktionalen, endkonturnahen Bauteilen durch EBM in Verbindung mit Kunststoffmodellen zur Planung im Medizinbereich kann ganze Operationsschritte entfallen lassen und dadurch deren Material- und Personalkosten sowie Belastungen für den Patienten verringern (Volpe et al. 2018; Ameen et al. 2018b).

Die Nutzung gradierter Strukturen in Verbindung mit der Individualisierung ist mittels EBM im medizinischen Sektor praktisch umgesetzt. Im diesem Bereich wird EBM als eines der wichtigsten Verfahren bei der Herstellung von Implantaten für verschiedene Knochenersatzstrukturen beschrieben, wodurch Infektionen, Lockerungen, implantatbedingter Knochenabbau und mechanisches Versagen verhindert werden können (Murr 2017). Die Gestaltungsfreiheit erlaubt hierbei patientenindividuelle Anpassungen. Darüber hinaus kann mit bereichsspezifischem Einsatz von offenporösen Gitterstrukturen das Materialverhalten des Knochens abgebildet werden (vgl. Harun et al. 2017). Hierbei sind die verfahrenstypischen rauen Oberflächen von Vorteil, da diese in Kombination mit offenporösen Oberflächenstrukturierungen das Einwachsverhalten begünstigen (Wang et al. 2016a; Sing et al. 2015). Aufgrund der rauen Oberfläche lassen sich zudem höhere Kräfte übertragen (Ruppert et al. 2017). Die Biokompatibilität von gestaltoptimierten EBM-Implantaten ist zudem in Form von Patientenstudien nachgewiesen (Zippelius et al. 2018).

Die Integration und Optimierung von Kühlkanälen sind weitere Einsatzmöglichkeiten. Bezogen auf den EBM-Prozess ist dies mit Einschränkungen bei der Pulverentfernung verbunden. Das in den Kanälen verbleibende und angesinterte Pulver muss gelockert werden, um es zu entfernen. Demensprechend ist bei der Konstruktion der Strukturverläufe des Kanals neben der Realisierung der Kühlwirkung die Pulverentfernbarkeit zu berücksichtigen (Rochman und Kate Borg 2014). Durch die Änderung der Kanalstruktur weg von kreisförmigen Querschnitten lässt sich die Kühlleistung dieser EBM-Kühlstrukturen mitunter weiter erhöhen (Rännar et al. 2007).

Ein weiterer Ansatz ist die Nutzung formkomplexer, elektromagnetischer Strukturen, wodurch beispielsweise Signalbandbreiten gezielt und individuell manipuliert werden können. Die entsprechend schlanken Strukturen sind mittels EBM ohne Stützstrukturen herstellbar (Byers und Barr 2018; Mufti et al. 2017; Persenot et al. 2018a; Petrovic et al. 2010). Verzweigte Strukturen innerhalb des Bauteils lassen sich dadurch ebenfalls integrieren (Fiaz 2016). Unter Beachtung der thermischen Belastungen durch den Bauprozess ist es möglich, Sensoren im Zuge des EBM-Prozesses einzubetten (Hossain et al. 2016; Hossain et al. 2018). Durch spezielle gitterartige Strukturen und

deren Anordnung lassen sich zudem das Bauteilverhalten signifikant beeinflussen und beispielsweise eine Querkontraktion < 0 erreichen (Fu et al. 2017; Warmuth et al. 2017).

Eine weitere Funktion, deren Integration oder Optimierung typischerweise in Verbindung mit der additiven Fertigung genannt wird, ist der Leichtbau. Die Gewichtsreduktionen, welche durch die Nutzung der pulverbettbasierten, metalladditiven Fertigungsprozesse LBM und EBM erreichbar sind, werden in Tabelle 17 in Anlage A-6, S. 181 dargestellt. Gemittelt über beide Technologien hinweg ist ein Masseneinsparpotenzial von 42 % erreichbar. Unter Berücksichtigung gleichbleibender oder verringerter Bauteilnachgiebigkeit lässt sich das Gewicht im Mittel um 35 % verringern.

Abschließend seien die Potenziale durch Prozessierung bestimmter Legierungen erwähnt. Die EBM-Prozessführung erlaubt die Verarbeitung von Materialkombinationen, welche beispielsweise mit laserbasierten Prozessen nicht beziehungsweise ausschließlich im Labormaßstab prozessiert werden können. Obwohl die Prozessführungen durch den Anlagenhersteller speziell für Ti6Al4V, Ti6Al4V Extra Low Interstitials, Titan Grade 2, Cobalt-Chrom-Legierung und die Nickelbasislegierung 718 verfügbar sind, wurden bereits weitere Legierungen mittels EBM verarbeitet. Beispielhaft seien hierbei Reinkupfer, Edelstahl 316L, Warmarbeitsstahl H13, Titanaluminide sowie weitere Nickelbasislegierungen genannt (Körner 2016).

Zusammenfassend lassen sich aus diesem Abschnitt vier grundlegende Potenziale abstrahieren.

1. Funktions- und Bauteilintegration

EBM eignet sich grundlegend zur Konsolidierung von konventionell getrennt ausgeführten Bauteilen und Funktionen. Darunter sind neben funktionalen Geometrien wie Gitter oder Leichtbaustrukturen die material- und legierungsbedingten Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit sowie hohe Wärmeleitfähigkeit und -beständigkeit als beispielhafte Funktionen definiert.

2. Funktionsoptimierung

Das Verhalten dieser integrierten Strukturen lässt sich durch die Möglichkeiten des EBM verbessern. Gewichtsreduktion, Kühlleistungssteigerung, Steifigkeits- oder Lebensdauererhöhung sind hierdurch beschrieben. Zudem lässt sich der Funktionsumfang erweitern, indem neben bestimmten Hauptfunktionen entsprechende Unterfunktionen integriert werden.

3. Wirtschaftliche Aspekte

Äußere Anforderungen, welche nicht direkt die Funktion betreffen, die allerdings die Produktentwicklung entscheidend beeinflussen können, haben das Potenzial durch EBM effizienter umgesetzt zu werden. Beispielhaft seien hier die Verringerung des Materialabfalls in Herstellprozessen, verringerte Lagerkosten und Werkzeugverschleiß sowie die höhere Herstellgeschwindigkeiten im Vergleich zu konventionellen sowie vergleichbaren additiven Prozessen genannt.

4. Individualisierung

EBM wird bereits in der industriellen Anwendung zur Herstellung von Implantaten eingesetzt. In diesen und allen weiteren Bereichen, wo individuelle Wünsche oder Anforderungen hohe Relevanz besitzen, kann EBM eine Lösung darstellen. Die einzelnen Potenziale sind zusammenhängend zu betrachten. Je größer die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten innerhalb der herzustellenden Geometrie ist, desto wahrscheinlicher ist eine profitable Herstellung mittels EBM.

Die genannten Potenziale sind speziell dem EBM zuzuordnen. Im Rahmen der Arbeit ist nicht untersucht worden, ob diese Potenziale auf weitere additive Verfahren zutreffen.

2.3.2 Leichtbau in der Produktentwicklung

Ziel von Leichtbaukonstruktionen ist es, das Eigengewicht eines Produktes bei gegebenen Anforderung, welche zur Funktionserfüllung relevant sind, möglichst zu minimieren (Klein 2013). Die Konstruktionsstrategien zur Realisierung von Leichtbaustrukturen können in folgende vier Kategorien unterteilt werden (Klein 2013).

- Form- und Funktionsleichtbau, bei dem dünnwandige Strukturen und eindeutige Lastleitpfade eingesetzt werden,
- Stoffleichtbau durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen,
- Fertigungsleichtbau, bei welchem durch Funktionsintegration der Material- und Fügeaufwand reduziert wird und
- Sparleichtbau, welcher durch geringe Prozesskosten bei Werkstoffeinsatz, -qualität und Herstellung ausgezeichnet ist.

Die Methodik zur Umsetzung von Leichtbaukonstruktionen ist weitgehend identisch mit der generellen Herangehensweise nach VDI 2221 und wird um den Einsatz von Prototypen als Ausgangssituation für Optimierung nach der Ausarbeitungsphase ergänzt (vgl. Klein 2013). Zudem sind verstärkt Methoden zur theoretischen Berechnung und Auslegung, wie das Berücksichtigen von Betriebs- und Belastungsverhalten zur

Erbringung von Festigkeitsnachweisen, Bestandteil von Leichtbaukonstruktionen. Mit steigender Leichtbaukomplexität und Rechenressourcen werden in der Praxis zur Lösung dieser Berechnung vermehrt numerische anstatt analytische Lösungsverfahren verwendet. Ziel derer ist es, vorhandene Geometrien in geometrisch und mechanisch einfach beschreibbare, kleine Grundelemente, sogenannte Finite-Elemente (FE), zu unterteilen (Klein 2013). Das Verfahren ist als Finite-Elemente-Methode (FEM) bekannt und wird im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

2.3.3 Strukturoptimierung in Verbindung mit der additiven Fertigung

Entsprechend der Konstruktionsmethodik für die additive Fertigung (vgl. Abbildung 9, S. 31) ist die Strukturoptimierung Teil der Entwurfs- und Ausgestaltungsphase, um optimale Bauteilgeometrien in Abhängigkeit der Optimierungskriterien und -randbedingungen zu erzeugen. Im Kontext dieser Arbeit steht die Anwendung der Strukturoptimierung zur Erzeugung additiv herstellbarer Geometrien im Vordergrund. Auf Basis ausgewählter Grundlagen wird die Vorgehensweise von Strukturoptimierungen dargestellt. Darauf aufbauend werden Herausforderungen und Möglichkeiten bezogen auf die additive Fertigung im Allgemeinen herausgearbeitet, um die Anwendbarkeit für EBM im Zuge der Arbeit zu bewerten.

2.3.3.1 Grundlagen der Strukturoptimierung

Die Durchführung einer Optimierungsrechnung mit entsprechenden Lösungsmethoden ist abhängig von der Gestalt und Diskretisierung des Ausgangsmodells beziehungsweise der Definition des Lösungsraumes. In Anbetracht des Einsatzes innerhalb der Konstruktionsmethodik folgt, dass grundlegende Rahmenbedingungen aus Phase I & II (vgl. Abbildung 9, S. 31) vorliegen. Mithilfe der anforderungs- und funktionsbedingten Belastung ist es das Ziel das Bauteilverhalten vorherzusagen. Dieser als Computer Aided Engineering (CAE) bekannte Ansatz beinhaltet das Berechnen und Simulieren mithilfe wirklichkeitsnaher Modellabbildung. Im Zuge dessen zählt unter anderem die Strukturanalyse mittels numerischer FEM zu den typischen Anwendungen (Feldhusen und Grote 2013). Dadurch erfolgt die Zerlegung des konstruierten Gebildes in geometrisch bestimmte, endlich kleine Elemente. Diese sind an bestimmten Knoten miteinander verbunden. Deren Spannungs- und Verschiebungsverhalten ist durch Parameter aus den Materialeigenschaften, der Geometrie sowie äußeren Einflüssen aus Belastungen oder Nachbarknoten über Ansatzfunktionen kalkulierbar. Die Gesamtheit der Funktionen wird als Differentialgleichungssystem numerisch gelöst, wobei nach dem Prinzip der virtuellen Arbeit den Änderungen äußerer Kräfte gleichermaßen innere Energieänderungen gegenüberstehen. Im Falle statischer Belastung folgt die Gleichung

(2.3) worin \mathbf{K} die Steifigkeitsmatrix, \vec{v} die vektorielle Verschiebung und \mathbf{F} die Gesamtheit der äußeren Kräfte darstellt (Schumacher 2013).

$$\mathbf{K}\vec{v} = \mathbf{F} \quad (2.3)$$

Vorteil der FEM ist die realitätsnahe Anwendbarkeit auf komplexe, dreidimensionale Gebilde. Andere Methoden wie beispielsweise analytische Verfahren der Strukturmechanik oder diskret beschriebene, stabtragwerksähnliche Modelle bilden das System mitunter unzureichend ab. Als wesentlicher Nachteil der FEM werden hohe Spannungsgradienten, sogenannte Singularitäten, aufgrund des Elementverschiebungsansatzes beschrieben (Schumacher 2013). Deren Erkennen und Eliminieren durch Erfahrungswissen und ausreichender Netzverfeinerungen sind elementar für realistische Ergebnisse (Welsch 2015). In Bezug zur Strukturoptimierung ist die FEM „[...] das leistungsfähigste Verfahren zur Strukturanalyse.“ (Schumacher 2013).

Der im Zuge der Arbeit untersuchte Ansatz beruht auf der mathematischen Programmierung zur Lösung strukturmechanischer Probleme mit einer oder mehrerer Zielfunktionen unter Berücksichtigung von Randbedingungen. Typischerweise sind diese als Extremwertaufgaben definiert. Dementsprechend werden die Entwurfsvariablen des Gleichungssystems solange geändert, bis Abbruchkriterien in Form bestimmter Ergebnisse der Zielfunktion oder eine gewisse Anzahl an Iterationen erreicht sind. Die für die vorliegende Arbeit relevante Methode ist die Solid-Isotropic-Material-with-Penalization (SIMP) (Bendsøe und Sigmund 2004). Diese beruht auf dem Prinzip der Pixel-Methode, bei der jedes Element beziehungsweise Pixel X_i im Zuge der Optimierung den Wert 0 für Entfernung oder 1 für Verbleib der Struktur erhält (Schumacher 2013). Das SIMP-Verfahren erzeugt überdies einen dazwischenliegenden Wert. Hierzu wird jedem Element X_i ein dimensionsloser Dichtefaktor $0 < X_i < 1$ aus der realen Dichte des Werkstoffes ρ_0 und einer relativen Dichte des Elements ρ_r zugewiesen.

Der Dichtefaktor erzeugt basierend auf dem Elastizitätsmodul (E-Modul) für ein dichtes Element E_0 einen relativen E-Modul E_r . Aufgabe des Optimierungsalgorithmusses ist es, die Elemente mit hoher benötigter Steifigkeit zur Erfüllung des Ziels zu identifizieren. Diese Elemente erhalten hohe Dichtefaktoren. Der namensgebende Strafaxponent der SIMP-Methode $\zeta \geq 0$ wird zudem genutzt, um die Werte in Richtung der Grenzen zu diskretisieren. Der Zusammenhang ist in Gleichung (2.4) dargestellt (Harzheim 2008).

$$X_i^\zeta = \left(\frac{\rho_r}{\rho_0}\right)^\zeta = \frac{E_r}{E_0} \quad (2.4)$$

2.3.3.2 Methode der Strukturoptimierung im Kontext der additiven Fertigung

Der allgemeine Ablauf einer FEM-Analyse in Verbindung mit der darauf basierenden Strukturoptimierung ist in Abbildung 10 dargestellt (nach Vajna et al. 2009; Schumacher 2013).

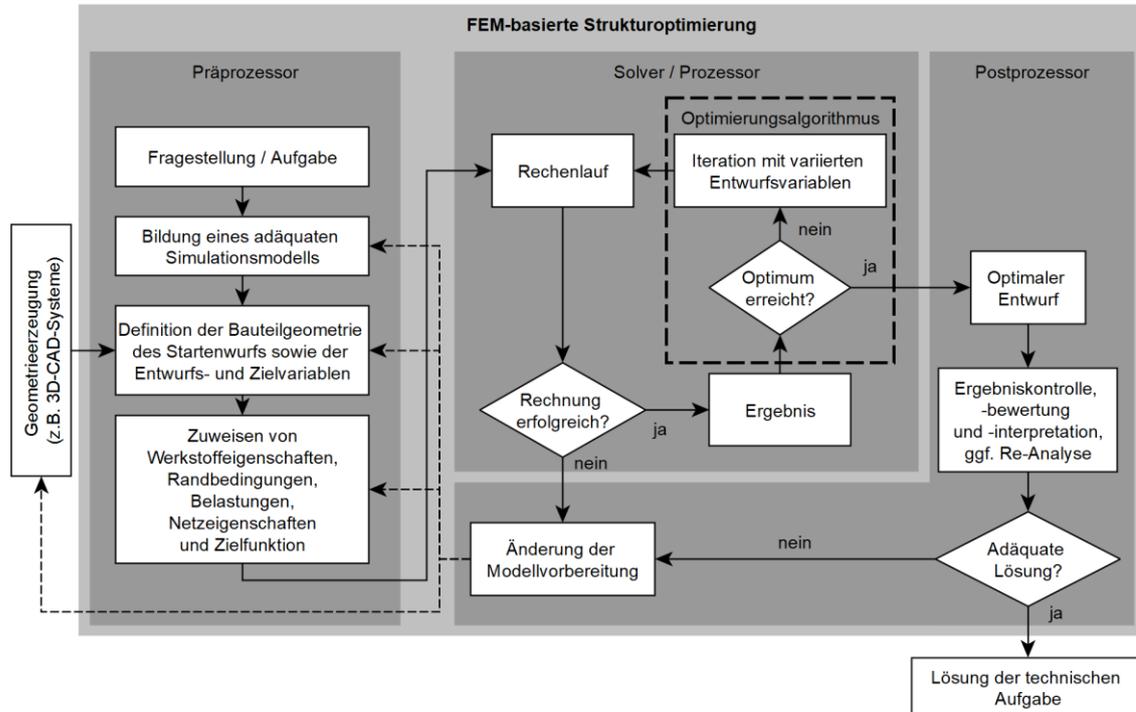


Abbildung 10 Ablauf einer Strukturoptimierung (Eigene Darstellung, nach Vajna et al. 2009; Schumacher 2013)

Die Phasen des Prä- und Postprozessors innerhalb des Ablaufs dienen der kommunikativen Interpretation mit dem Solver und verlangen Nutzereingaben. Als Ausgangsgeometrie sind optimierungsraumbegrenzende, zwei- oder dreidimensionale Modelle notwendig. Diese werden im Zuge der Modellvorbereitung in veränderliche und nicht veränderliche Designbereiche untergliedert. Durch den Optimierungsalgorithmus lassen sich erstere bis zur Erfüllung der Abbruchbedingungen verändern. Die relevantesten physikalischen und mechanischen Eigenschaften zur Durchführung einer Strukturoptimierung sind die Dichte, die Wärmeausdehnung und -leitfähigkeit, mechanische Auslegungsspannungen, E-Modul, Querkontraktion und gegebenenfalls Bruchzähigkeit (Klein 2013).

Zur Überführung theoretischer, funktionsbedingten Strukturoptimierungen in praktisch anwendbare CAE-Werkzeuge besitzen die Softwareumgebungen weitere definierbare Randbedingungen wie minimale und maximale Strukturweiten, welche aus dem Einsatz bestimmter Fertigungstechnologien herrühren (Vatanabe et al. 2016). Auszüge dieser Erweiterungen speziell für die Strukturoptimierung hinsichtlich der additiven Fertigung

sowie des verwendeten Solvers Optistruct™ und dem Prä- beziehungsweise Postprozessor HyperMesh® sind in der Literatur aufgeführt (Schumacher 2013).

Für die additive Fertigung und den daraus resultierenden fertigungsbedingten Herausforderungen (vgl. Abschnitt 2.2.2.1) existieren zudem Ansätze zur Optimierung der Orientierung von Bauteilen oder Strukturen. Als Treiber sind die Vermeidung von Eigenspannungen, Strukturhotspots, hohe Supportmengen, orientierungsbedingte Rauheit, Herstellkosten und -zeit zu nennen. Da Eigenspannungen und hohe Supportmengen im Zuge des EBM wenig Relevanz besitzen und die Rauheit nur bedingt reduziert oder beeinflusst werden kann, werden diese als Optimierungskriterien für die vorliegende Arbeit vernachlässigt. Zu deren Betrachtung speziell für das LBM sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Zwier und Wits 2016; Leutenecker-Twelsiek et al. 2016; Khodaygan und Golmohammadi 2017; Danjou und Köhler 2010; Delfs et al. 2016; Zhang und Zhou 2018; Wang et al. 2018c; Gaynor und Guest 2016; Garaigordobil et al. 2018; Ranjan et al. 2017; Langelaar 2016, 2018; Krol et al. 2013; Brackett et al. 2011; Teufelhart 2016; Rosen 2007; Cheng et al. 2018).

2.3.4 Modelldatenerzeugung und deren Umwandlung

Der Einsatz numerischer Verfahren zur Strukturoptimierung mehrdimensionaler Geometrien erfordert bestimmte Datentransformationen. Diese stellen oftmals ein Hindernis für die praktische Anwendung dar. Wenngleich neutrale Schnittstellen zum Austausch existieren, entstehen zumeist Fehlstellen, welche sich nicht oder nur manuell reparieren lassen. Die Ergebnisse einer Optimierung können „[...] nicht automatisch überführt werden, da eine funktionierende Rückkopplung vom FEM-Programm zum 3D-CAD-System nicht existiert.“ (Feldhusen und Grote 2013). Im Sinne der additiven Fertigung bestehen ähnliche Herausforderungen durch die Nutzung der typischen Dateiformate. Allerdings lassen sich beispielsweise FEM-Ergebnisse durch die diskrete Beschreibungsart direkt in STL-Daten überführen und fertigen. Die Rückführung und Rekonstruktion von strukturoptimierten Daten sind dann notwendig, wenn technische Anforderungen wie beispielsweise Toleranzen existieren. Wenngleich aktuelle additive Datenformate die Fähigkeit besitzen, diese Informationen zu speichern (vgl. ISO/ASTM 52915) und an die Fertigungsanlage zu übertragen, liegen die laserbasierten, additiven Herstellverfahren bei den Toleranzgraden nach DIN ISO 286 im Bereich IT10-15 (Lieneke et al. 2015; Lieneke et al. 2016). Zu Erzeugung höherer Präzision sind Nachbearbeitungsschritte notwendig. Zwei separate Datensätze für die additive und nachbearbeitende Fertigung wären die Folge (Schmelzle et al. 2015).

Im Bereich des CAD ist die Beschreibung durch analytische, mehrdimensionale Kurven und Flächen unter dem Begriff Geometrische Modellierung (Computer Aided Geometric Design, CAGD) zusammengefasst (Farin 1994). Darunter sind die Möglichkeiten zur Erzeugung von Punkten, Vektoren, Kurven einfacher und höherer Ordnungen sowie Methoden zur Bestimmung resultierender Flächen eingeschlossen. Daraus abgeleitet lassen sich Flächenverbunde zur Erzeugung eines Volumens beziehungsweise einer soliden Geometrie vereinen. Die simpelste Form dieser sind solide Primitive. Deren Beschreibung erfolgt über parametrische Grundkörper, wie Blöcke, Zylinder oder Tori, sowie das Austragen von Konturen oder Vereinen von Halbräumen (Hoffmann 1993). Neben lokalen Modifikationen der Primitiven ist die Interaktion mehrerer Körper durch Boolesche Operationen möglich und wird als Constructive Solid Geometry (CSG) bezeichnet (Hoffmann 1993). Neben dem CSG erfolgt die Erzeugung solider Geometrien durch Nutzung des Begrenzungsflächenmodells (Boundary Representation, B-rep). Im Gegensatz zum CSG beschreibt das B-rep nur die Ausrichtung der Flächen. Die Geometrie, aus welchem ein solides Volumen resultiert, wird zusammengesetzt aus Eckpunkten, Kanten und Flächen. Über Stützpunkte anhand eines Polyeders lassen sich Kurven und folglich Flächen annähern. Hierzu sind Algorithmen nach de Casteljau und Bézier nutzbar. Für diese und weiterführende Approximationen sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Hoffmann 1993; Farin 1994). Dadurch ist das B-rep als indirekte und CSG als direkte Modellierung zu unterscheiden. Da die FEM-Datenbeschreibung als Polyeder darstellbar ist, kann mittels B-rep eine voluminöse Geometrie angenähert werden. Die Überführung von B-rep zu CSG Geometrien zur Nutzung numerischer Steuerungen (Numerical Control, NC), ist Teil des Reverse Engineering (RE). Bezogen auf die Digitalisierung beschreibt RE den Vorgang, „[...] aus einem bestehenden, fertigen System oder [...] gefertigten Produkt durch Untersuchung der Strukturen, Zustände und Verhaltensweisen, die Konstruktionselemente zu extrahieren.“ (Schöne 2013). Ziel dieser Methoden ist die Erzeugung von Primitiven auf Basis diskreter Daten beziehungsweise des daraus erzeugten B-rep. Im Gegensatz zur Rückführung der diskreten Daten ermöglicht die Manipulierbarkeit des B-rep die Anpassungen eines bereits soliden Volumens an die diskrete Beschreibungsform als eine Art generative Modellierung. Hieraus ergeben sich folgende drei methodische Ansätze zur Erzeugung eines additiv herstellbaren und NC-nachbearbeitbaren Modells.

1. Nutzung des CSG zur Neukonstruktion in Anlehnung an das optimierte Ergebnis
2. Nutzung des B-rep zur Rückführung des Ergebnisses
3. Nutzung des B-rep zur Neukonstruktion in Anlehnung an das optimierte Ergebnis

Deren effiziente Anwendung soll im Zuge der Arbeit untersucht werden.

2.4 Design for Additive Manufacturing

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird das Design for Additive Manufacturing (DfAM) als restriktives Hilfsmittel bei der additivgerechten Gestaltung verwendet (vgl. Phase III in Abbildung 9, S. 31). Die Anwendung dieser konkreten Konstruktionsempfehlung ist im Gestaltungsprozess der letzten Phase, dem Ausarbeiten, zuzuordnen. Per Definition werden die restriktiven Hilfsmittel zur Gestaltentwicklung wie folgt eingeteilt (Feldhusen und Grote 2013).

- **Gestaltungsregeln**
Gestaltungsregeln sind immer anzuwenden und führen im Allgemeinen zu funktionssicheren und kostengünstigen Produkten.
- **Gestaltungsprinzipien**
Die Gestaltungsprinzipien unterstützen eine funktionssichere und kostengünstige Gestaltung unter Berücksichtigung besonderer Aspekte, wie zum Beispiel die in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Leichtbauprinzipien
- **Gestaltungsrichtlinien oder -empfehlungen**
Diese sind bei bestimmten Bedingungen wie beispielsweise für explizite Fertigungstechnologien anwendbar.

Die Erarbeitung entsprechender Regeln für die additive Fertigung ist herausfordernd. Durch die Vielfalt an Verfahren und deren physikalisch-technischen Abläufe sind gewisse Varianzen in den erzielbaren, geometrischen Möglichkeiten zu verzeichnen. Innerhalb einer Verfahrenskategorie, wie beispielsweise dem LBM, lassen sich unterschiedliche Ergebnisse zwischen einzelnen Anlagenherstellern finden. Gründe hierfür sind zumeist seitens Hard- und Software zu suchen. Verschiedene Legierungen verlangen aufgrund unterschiedlicher Schmelzpunkte und Wärmeleitverhalten spezifische Prozessführungen, welche Einfluss auf die herstellbaren Geometrien haben (Braian et al. 2018; Wang et al. 2017a).

Aufgrund der Einflussfaktoren auf eine additive Fertigungstechnologie (vgl. Abschnitt 2.2.2) lassen sich quantitative Darstellungen von fertigungstechnischen Grenzen nur bedingt auf weitere Material-Anlagen-Prozessparameter-Systeme (MAPS) übertragen und zählen folglich per Definition zu den Gestaltungs- beziehungsweise Konstruktionsrichtlinien. Bei der Entwicklung dieser und deren quantitativer Darstellung ist die Definition der entsprechenden MAPS sinnvoll (Lammers et al. 2018; Tominski et al. 2018).

Im Folgenden werden aus der Literatur bestimmte Gestaltungsregeln und -richtlinien in Bezug auf die metalladditive Fertigung zusammengefasst.

2.4.1 Gestaltungsregeln der pulverbettbasierten additiven Fertigung

In den vergangenen Jahren sind eine Vielzahl von Gestaltungsrichtlinien für additive Verfahren entwickelt worden. Verfahrens- und materialübergreifend identische Empfehlungen erlauben die Konsolidierung zu Gestaltungsregeln. Tabelle 18 in Anlage A-7, S. 185 stellt auszugsweise verfahrensübergreifende Regeln dar (nach Zäh 2006). Die speziell für EBM entwickelten Gestaltungsempfehlungen werden im Folgenden zusammengetragen.

2.4.2 Gestaltungsrichtlinien für EBM

Ein geeignetes Hilfsmittel zur Darstellung von Gestaltungsrichtlinien für die konstruktive Ausarbeitung der Strukturen stellen Konstruktionskataloge dar. Diese dienen dazu, Konstruktionsaufgaben unabhängig vom Wissensstand des Konstrukteurs zu lösen (VDI 2222-2). Grundlegend lassen sich Konstruktionskataloge für jeden Schritt im methodischen Konstruktionsprozess einsetzen. Je nach deren Zweck, werden Konstruktionskataloge in Objekt-, Operations- oder Lösungskataloge eingeteilt (VDI 2222-2). Der Anwendungszweck im Rahmen der vorliegenden Arbeit bezieht sich auf die Ausführung der konstruktiven Ausgestaltung und ist folglich per Definition als Operationskatalog aufzufassen. Bei der Erstellung von Konstruktionskatalogen sind bestimmte Anforderungen zu beachten (Feldhusen und Grote 2013; Ehrlenspiel und Meerkamm 2013). Großer Wert wird zudem auf die Handhabbarkeit durch eine angemessene Gliederung gelegt. Je nach Phase im Konstruktionsprozess sind bestimmte Einteilungen sinnvoll. Ferner ist auf die entsprechende Konkretisierung zu achten, welche unter Umständen bereits lösungseinschränkend interpretiert werden kann (Feldhusen und Grote 2013; VDI 2222-2). Aufgrund des Umfangs an herstellbaren Geometrien und der Masse an Einflussgrößen auf die technologischen Grenzen additiver Verfahren sind Konstruktionskataloge für additive Verfahren, welche allumfassende, quantitative und qualitative Aussagen zu Gestaltungseigenschaften widerspiegeln, bisher wenig erarbeitet worden. Vorrangig wurden einzelne Studien bestimmter Strukturelemente veröffentlicht. Am exemplarischen Aufbau eines möglichen Konstruktionskataloges entsprechend der VDI 2222-2 sind Literaturquellen zu Gestaltungsempfehlungen für EBM und zu Vergleichszwecken für LBM in Tabelle 19 in Anlage A-8, S.186 dargestellt (in Anlehnung an Kranz 2017).

Die Tabelle zeigt, dass die Datenlage zu Konstruktionsrichtlinien für EBM gering ist, was zudem in der Literatur bestätigt wird (Kumke 2018). Die relevanten Ergebnisse für das

EBM werden im Folgenden zusammengefasst. Für die Betrachtung der jeweiligen MAPS sei auf die entsprechende Literatur verwiesen.

Die minimale, herstellbare Strukturdicke befindet sich im Bereich von 0,5 mm bis 0,6 mm senkrecht zur Baurichtung (Finzel 2016; Dehoff et al. 2016; Vayre et al. 2013). Die Herstellung von Durchmessern von bis zu 0,1 mm sollen durch angepasste Prozessführungen möglich sein (Zhang et al. 2018). Die Fertigung von kreisförmigen Öffnungen mit der Achse parallel zur Bauebene ohne Stützstrukturen ist bis zu einem Durchmesser von 30 mm ohne fertigungsbeeinflussende Formfehler möglich. Eine vergleichsweise wenig verformte Struktur wurde dabei bis zu einem Durchmesser von 18 mm erreicht (Ameen et al. 2018a). Der kritische Überhangwinkel, ab welchem Stützstrukturen vorzusehen sind, wird mit ca. 30° angegeben. Zudem seien Stützstrukturen bei vergleichsweise großen Überhangflächen ausschließlich im Randbereich der Struktur ausreichend (Grandvallet et al. 2018). Durch den Vorheizprozess beim EBM ist die Möglichkeit der Überschusspulverentfernung auf Kanaldurchmesser > 5 mm begrenzt (Dehoff et al. 2016). Kleine Strukturmaße führen mitunter zu Änderungen der Materialeigenschaften. Maße ≤ 4 mm führen zu verringerten Festigkeiten. Bei 0,5 mm Durchmesser sind diese ca. 50% geringer (Karlsson 2015; Karlsson Algardh et al. 2016). Begründet wird dies durch Versprödungen aufgrund der veränderten Mikrostruktur (Kok et al. 2016). Andere Untersuchungen zeigen hingegen unveränderte Festigkeiten trotz der rauen wie-gebaut Oberfläche bei 3 mm oder bei mechanisch nachbearbeiteten 2 mm Durchmesser (Wang et al. 2018a; Suard 2015).

Beim EBM existieren Abweichungen zwischen dem Soll- und Istdurchmesser von hergestellten Strukturen. Dabei sind jeweils die realen Strukturen, welche entlang der Baurichtung gefertigt wurden, schmaler als die modellierten. Umgekehrt verhält sich dies bei Strukturen parallel zur Bauebene. Als Gründe werden die Rauheit aufgrund der Messstrategie, die Prozessführung sowie der schichtweise Aufbau genannt (Dolimont et al. 2015; Weißmann et al. 2017; Suard 2015).

2.4.3 Maß-, Form- und Lagetoleranzen

Beschreibungen für zulässige Geometrieabweichungen setzen sich aus makro- und mikrogeometrischen Eigenschaften zusammen. Erstere sind beschrieben durch Maß-, Form- und Lagetoleranzen (Feldhusen und Grote 2013). Diese geben an, inwiefern bestimmte geometrische Eigenschaften von deren Nenn- beziehungsweise Sollzustand abweichen dürfen. Entsprechend Ihrer Definition beziehen sich die Abweichungen auf bestimmte Formen und deren Lage, wie Rundheit, Geradheit, Zylindrizität, Parallelität oder auf bestimmte Maße. Diese werden in verschiedenen Richtlinien, wie zum Beispiel

der DIN 7154, DIN 7144, DIN 2768 und ISO 286, definiert. Mithilfe der darin enthaltenen Toleranzklassen und -felder sind die zulässigen Abweichungen in Abhängigkeit des Nennmaßes oder der zu erzielenden Formeigenschaften definiert (Feldhusen und Grote 2013). Die mikrogeometrischen Eigenschaften umfassen im Wesentlichen die Oberflächenstruktur und deren Kennwerte zur Rauheit (Feldhusen und Grote 2013). Deren Definitionen und Bedingungen zur Messung der Größen sind in der DIN EN ISO 4288 beschrieben. Zumeist treten die makro- und mikroskopischen Abweichungen in Kombination auf (DIN 4760).

Aus Sicht der Produktentwicklung sind sowohl Toleranzen als auch Rauheiten im Zuge der Gestaltung von herzustellenden Geometrien vorzugeben (Feldhusen und Grote 2013). Bezogen auf die additive Fertigung ist die Realisierung der Toleranzen von technologischen Grenzen bestimmt. Generell gehen Vorgaben im Zuge der Konstruktion durch den Transfer in das STL-Datenformat verloren. Zudem kann die grobe Zerlegung der Geometrie in ein Dreiecksnetz dazu führen, dass der Geometrieverlauf außerhalb der Toleranz liegt. Ferner können Fertigungsparameter sowie nachträglicher Schrumpf oder Bauteilverzug zu nicht eingehaltenen Toleranzanforderung führen. Die Rauheit, vor allem bei pulverbettbasierten Verfahren, ist maßgeblich von verwendeten Pulverkorngrößen abhängig. Zudem können hier die Orientierung sowie der damit verbundene Treppenstufeneffekt (vgl. Abschnitt 2.2.2.1.1) die Genauigkeit begrenzen.

Der Stand der Technik zu realisierbaren Toleranzen und Rauheiten für EBM ist nachfolgend dargestellt. Da im Zuge der Arbeit keine Untersuchungen zur Rauheit angestrebt sind, wird hierzu ein entsprechendes Review durchgeführt und dieses methoden- und einflussbasiert aufbereitet.

Bezüglich der erreichbaren Toleranzen beim EBM ist eine Untersuchung bekannt, welche das Verfahren in die Toleranzgrade nach DIN ISO 286 eingliedert. Demnach lässt sich dieses in den Bereichen IT12 bis IT15 einordnen, wenngleich die untersuchten Dimensionen auf maximale Abmaße von bis zu 104 mm begrenzt sind und deren Messung ausschließlich in Z-Richtung durchgeführt wurden (Dolimont et al. 2015). Damit ist EBM in ähnlichen Bereichen verglichen mit anderen metallpulverbettbasierten, additiven Verfahren zu finden (Lieneke et al. 2015).

Der arithmetische Mittelwert der Rauheit beim EBM besitzt nach dem Datenblatt für die Anlage Arcam A2X Werte im Bereich $Ra = 25 \mu\text{m}$ für Oberflächen $\nu = 0^\circ$ und $Ra = 35 \mu\text{m}$ für Oberflächen $\nu = \delta = 90^\circ$ (Arcam AB). Untersuchungen zeigen jedoch, dass dies abhängig von Material und Korngrößenverteilung sowie der entsprechenden Prozessführung ist. Zudem sind mittels unterschiedlicher Messverfahren und -strategien

verschiedene Ergebnisse erzielbar. Die Beschreibung der etablierten Messgrößen, Messverfahren, dazugehörige Messstrecken und Filter zum Ausschluss von Welligkeiten lassen sich der DIN EN ISO 4287 für das Tastschnittverfahren und der DIN EN ISO 25178 für Flächenverfahren entnehmen. Empfehlungen zur Ermittlung der Rauheit für additiv hergestellte Bauteile sind in der VDI 3405-3 gegeben.

Zur Darstellung dieser Einflussgrößen und den erreichbaren Rauheiten ist ein Literaturreview durchgeführt worden. In den Untersuchungen wurden Testkörper mittels EBM an den Anlagen Arcam S12, A1, A2, Q10 und Q20plus mit dem Material Ti6Al4V hergestellt und deren Rauheit im wie-gebaut Zustand bestimmt. Zur Darstellung der entsprechenden Ergebnisse sei auf Anlage A-9, S. 189 ff. verwiesen. Folgende Erkenntnisse sind zusammengefasst festzuhalten.

- Der arithmetischer Mittelwert der Rauheit von Bauteilen, welche mittels EBM und Ti6Al4V hergestellt wurden, befinden sich in Abhängigkeit der Messstrategie im Bereich $Ra = 5 \mu\text{m}$ (taktil) bis $Ra = 57 \mu\text{m}$ (volumetomografisch).
- Die Rautiefen Rt können Werte bis nahezu $400 \mu\text{m}$ annehmen.
- Die Ergebnisse einer Messung sind explizit abhängig von der Erfassungstechnologie, Messdurchführung, der Oberflächenorientierung sowie den Werkstoff- und Prozessparametern.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeiten des EBM verfahrensbedingt begrenzt sind. Eine signifikante Verringerung der Rauheit oder Erhöhung der Genauigkeit ist darüber hinaus ausschließlich mit Nachbearbeitungsverfahren zu erreichen. Zu deren Betrachtung sei auf Abschnitt 2.2.3.2 verwiesen.

2.5 Potenzialbewertung und Kostenabschätzung

Bei der Auswahl möglicher Szenarien und Bauteile, welche additiv hergestellt werden sollen, sind zahlreiche verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Zur Abschätzung ist das Potenzial der Herstelltechnologie und die Abschätzung der damit verbunden Kosten für ein Anwendungsszenario hilfreich. Eine wirtschaftliche Anwendung, bei welcher das EBM Verfahren beispielsweise effizienter gegenüber anderen Technologien erscheint, sind Hüftimplantatschalen, wovon bereits bis zum Jahr 2012 ca. 1000 implantiert wurden (Murr et al. 2012).

Um die Potenziale bestimmter Anwendungen für das EBM herauszustellen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Potenzialabschätzungsalgorithmus und weiterführend eine Vorkostenkalkulation entwickelt. Ziel dieser Werkzeuge ist es, zu einem möglichst frühen

Zeitpunkt in der Produktentwicklung Aussagen zu treffen, ob EBM für die Herstellung einer Baugruppe oder eines Bauteils ratsam erscheint. Weiterführend soll dargelegt werden, wie die Kostenentwicklung für einen von der Losgröße abhängigen Anwendungsfall ist.

2.5.1 Potenzialbewertung der additiven Fertigung

Die Bewertung der Potenziale für ein spezielles Bauteil ist komplex. Neben der eigentlichen Funktion und den Anforderungen muss berücksichtigt werden, dass die finale Gestalt zum Zeitpunkt der Entscheidung für oder gegen ein ausgewähltes Bauteil meist nicht bekannt ist (vgl. Abbildung 9, S. 31). Nachfolgend sind Empfehlungen an entsprechende Auswahlwerkzeuge aufgeführt (Gibson et al. 2014).

- Die Informationen innerhalb des Systems sollten so unvoreingenommen wie möglich gestaltet sein.
- Die Methode soll eine Empfehlung oder Unterstützung darstellen und nicht einfach Zahlen berechnen.
- Eine Auswahl an Eingabemöglichkeiten sollten bereitgestellt werden, um Nutzer zu führen und den Einfluss bei Änderungen der Eingabe zu verdeutlichen.
- Das System sollte mit vergleichbaren und aktuellen Daten verknüpft sein.
- Nach der Methodenanwendung sollte ein Ausblick für weitere Schritte gegeben werden.

In erster Linie ist zu klären, ob ein Bauteil oder eine Baugruppe die Fähigkeit besitzt, die Verfahrensvorteile zu nutzen und effizienter gefertigt zu werden. In der Vielzahl der Fälle soll für ein bereits vorhandenes Bauteil oder eine Baugruppe geprüft werden, ob eine alternative Fertigung im EBM-Verfahren von Vorteil ist. Zudem kann eine komplexe, zeit- und kostenaufwendige konventionelle Fertigung Treiber für die Nutzung additiver Technologien sein. Mögliche technische und wirtschaftliche Faktoren für eine Vorauswahl relevanter Bauteile für die additive Fertigung sind dazu in der Literatur zu finden (Feldmann und Pumpe 2016). Weitere quantitative Faktoren, mit welchen sich additiver Technologien bewerten lassen, sind die Streckgrenze, die Materialhärte, die Dichtigkeit des prozessierten Materials, die Detailauflösung des Verfahrens, Geometriekomplexität sowie die Bauzeit und -kosten (nach Gibson et al. 2014).

Folglich lässt sich festhalten, dass bestimmte Faktoren für eine Bauteilbewertung zum Zeitpunkt der Prozessauswahl (vgl. Abbildung 9, S. 31) herangezogen werden können. Für die Bewertungsmethode der additiven Technologie kann angenommen werden, dass ein Bauraummodell des konventionellen Bauteils bereits vorhanden oder in dessen Dimensionen abschätzbar ist. Das zu entwickelnde Werkzeug soll ohne konkretes

Wissen über die Funktion des Bauteils nutzbar sein. Eine Methode, welche an konkreten Anwendungen das Potenzial für die Nutzung des EBM ermittelt, existiert derzeit nicht.

2.5.2 Kostenkalkulation

Die Betrachtung der Kosten kann entscheidend sein, um in eine Technologie zu investieren oder nicht. Speziell das EBM erfordert aufgrund erweiterter Anlagentechnologie wie Vakuumpumpe, Steuertechnik und Pulveraufbereitungssystem vergleichsweise hohe Anschaffungskosten. Dass es dennoch kosteneffizienter sein kann mit EBM zu fertigen, zeigt die Literatur (Cronskär et al. 2013).

Die entsprechende Kostenbestimmung lässt sich in qualitative und quantitative Verfahren einteilen. Für erstere werden heuristische Verfahren sowie Relativkosten, Kostenstrukturen und Grenzstückzahlen herangezogen, ohne konkrete Kalkulationen. Die quantitativen Verfahren hingegen nutzen Kalkulationen auf Basis von Pauschalen wie Kenngrößen oder Ähnlichkeiten sowie analytische Werte aus Geometrie- und Fertigungsdaten (Schmidt 1996). Zur Bestimmung des tatsächlich zu fertigenden Volumens bei einer unbekanntem additiven Konstruktion ist die Nutzung der konventionellen Gestalt sowie der einzelnen Bauteildimensionen und -volumina möglich (Hartogh und Vietor 2018; Baumers 2012). Dieser Begrenzungsraum wird zudem häufig als Ursprungsmodell einer Strukturoptimierung genutzt und im Zuge dessen um einen bestimmten Anteil reduziert. Erfahrungswerte zur prozentualen Verringerung des konventionellen Volumens und Materialeinsatzes sind möglich (vgl. Abschnitt 2.3.3). Wenngleich eine finale Konstruktion genauer wäre, lassen sich über diese Kenngrößen die Kosten entsprechend der Losgröße und der Anzahl an Bauteilen innerhalb des Bauraums bestimmen (Edlund 2017).

Die Grundlage zur Berechnung von Bauteilkosten für die additive Fertigung bildet die Summe aus Maschineninvestition, Maschinenbetriebskosten in Abhängigkeit der Bauzeit sowie Material- und Laborkosten (Gibson et al. 2014; Yim und Rosen 2012a; Yim und Rosen 2012b). Basierend darauf sind umfassende Kostenaufstellungen zum Laserstrahlschmelzen erstellt worden (Kranz 2017; Grund 2015). In Anlage A-10 werden in Abbildung 69, S. 196 die Gleichungen und in Tabelle 22, S. 198 die entsprechende Variablenbeschreibung eine Kostenermittlung dargestellt (nach Kranz 2017).

Der Aufbau dieser Kostenstruktur führt dazu, dass mit steigender Anzahl an Bauteilen die Kosten pro Bauteil sukzessive sinken. In der Realität ist dies nicht der Fall, da ab einer bestimmten Anzahl von Bauteilen eine neue Schicht an Bauteilen darüber hinzukommt, was die Bauhöhe und damit die Kosten steigen lässt. Bei Überschreitung des Bauraumlimits durch eine zu hohe Stückzahl wird zudem ein zweiter Bauzyklus

notwendig, was die Kosten ebenfalls erhöht (Zäh 2006). Nach Gleichung (A-10.7), S. 196 lässt sich die maximale Anzahl an Bauteilen in der Ebene bestimmen. Bei additiven Verfahren, die ein Stapeln der Teile erlauben, ist zudem die dritte Dimension nach gleichem Ansatz heranziehbar. Das Limit bildet hier die Bauraumhöhe.

2.6 Zusammenfassung zum Stand der Technik

Der Abschnitt zum Stand der Technik zeigt, dass umfassende Untersuchungen zur Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik für die additive Fertigung allgemein vorhanden sind. Allerdings ist der Bezug des EBM zu diesen wenig beziehungsweise nicht existent. Es gibt keine Methode zur Bewertung des EBM Verfahrens hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Kosten am Entscheidungsknoten der Konstruktionsmethodik (vgl. Anlage A-5, S. 180). Die Gestaltungsempfehlungen für EBM sind nur in geringem Maße und sehr vereinzelt für beispielsweise Überhangwinkel, minimal herstellbare Wandstärken und Pulverentfernbarkeit untersucht worden. Geometrische Abweichungen des Bauprozesses und folglich erreichbare Form- und Lagetoleranzen innerhalb des gesamten Bauraums sind nahezu unbekannt. Eine umfassende Sammlung in Form eines Konstruktionskataloges für EBM existiert bislang nicht. Ferner ist unklar welche Arten der Stützstrukturgestalt notwendig sind, um allgemeine Geometriestrukturen ohne Form- oder Prozessfehler bei gleichzeitig möglichst effizienter Entfernung dieser Supports herzustellen. Wenngleich verschiedene Materialeigenschaften der mit EBM verarbeitbaren Legierungen untersucht und folglich weitestgehend bekannt sind, wurden diese vorrangig anhand bestehender Normkörper erarbeitet. Speziell Festigkeitseigenschaften erfordern hierzu Standardmaße und nachträglich eingestellte, tolerierte Anforderungen an die Oberfläche und Form. Inwieweit diese Eigenschaften bei nicht genormten, filigranen, wie-gebaut Strukturen bestehen bleiben, ist nicht bekannt. Folglich sind für Strukturoptimierungen unzureichende Randbedingungen vorhanden, um Bauteileigenschaften realitätsnah abzubilden.

Die vorliegende Arbeit soll diese bestehenden Forschungslücken schließen und einen Beitrag zur umfassenden Implementierung des EBM Verfahrens in die Konstruktionsmethodik für additive Verfahren leisten.

3 Methode zur Bewertung des EBM als potenzielles Fertigungsverfahren

Im folgenden Abschnitt sollen die Möglichkeiten der frühzeitigen Darstellung und Bewertung der Potenziale des EBM untersucht werden. Ziel dieser Methoden ist es, auf Basis der bestehenden Konstruktionsmethodik für additive Fertigungsverfahren (vgl. Abbildung 9, S. 31) eine Aussage zu treffen, ob EBM im Zuge der Prozessauswahl und Wirtschaftlichkeitsanalyse als potenzielles Fertigungsverfahren sinnvoll ist. Dementsprechend sind die Daten, welche zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung vorliegen, nutzbar.

Bei der Methodenentwicklung sind die in Abschnitt 2.5.1 beschriebenen Randbedingungen zu beachten. Weiterführend soll unter Nutzung, Anpassung und Erweiterung der vorhandenen Kostenkalkulationsmöglichkeiten (vgl. Abschnitt 2.5.2) eine Abschätzung der zu erwartenden Fertigungskosten gegeben werden.

3.1 Potenzialabschätzung für das EBM

Zur Abschätzung des Potenzials des EBM-Verfahrens für eine bestimmte Anwendung ist zu berücksichtigen, welche Ziele und Anforderungen im Lösungsraum definiert sind. Es wird folglich eine Wahrscheinlichkeit errechnet, welche die effiziente Umsetzung der Ziele durch die Fertigung mittels EBM quantifizieren soll. Hierzu ist zwischen den Potenzialen des EBM, den Anforderungen des Anwenders beziehungsweise der Anwendung und den Randbedingungen des PEP zu unterscheiden.

3.1.1 Verfahrenspotenziale des EBM

Ausgehend von den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Anwendungsfällen für das EBM-Verfahren, zählen die Funktions- und Bauteilintegration, die Individualisierung sowie Funktionsoptimierung zu den relevanten und durch den Nutzer wählbaren Verfahrenspotenzialen des EBM P_{EBM} . Der wirtschaftliche Aspekt, welcher ebenfalls vorteilhaft erscheint, wird im nachfolgenden Abschnitt der Kostenabschätzung betrachtet.

Für den Anwender der Methode sind die genannten Aspekte als Entscheidungsfragen definiert und deren Wichtung zur neutralen, unvoreingenommenen Nutzung nicht dargestellt.

3.1.2 Verfahrenspotenzialbewertung des Anwenders

Zusätzlich zu den Potenzialen des EBM sind Aspekte aus dem Entwicklungsprozess zu charakterisieren, welche sich vorrangig aus den Anforderungen und Wünschen ergeben. Diese lassen sich je nach Relevanz für die Anwendung wichten. Zur einfachen Handhabung werden die drei Faktoren ‚unrelevant‘, ‚wichtig‘ und ‚zwingend erforderlich‘ mit Werten von 1 bis 3 vergeben, wodurch Wichtungen für Nutzenaspekte Gestaltungsfreiheit W_{GGF} , Leichtbau W_{GL} , Materialeffizienz W_{GME} und Verfahrenspotenziale $W_{GP_{EBM}}$ eingeführt werden. Die Gestaltungsfreiheit charakterisiert die Fähigkeit einer freien Bauteilstruktur. Bei einer komplexen, dreidimensionalen Problemstellung ist eine freie Gestaltwahl zur Realisierung ‚zwingend erforderlich‘. Einfache ein- oder zweidimensionale Strukturlösungen führen zu einer ‚unrelevanten‘ Gestaltungsfreiheit.

Durch die Faktoren erhalten tatsächlich vorhandene Potenziale, die im nachfolgenden Abschnitt dargestellt sind, eine entsprechende Relevanz. Da diese Wichtung einen subjektiven Charakter hat, wird der Analytische Hierarchieprozess (AHP) zur Objektivierung genutzt. Dadurch wird der vollständige Ausschluss eines gering gewerteten Potenzials verhindert und die Wichtungen untereinander relativiert (Saaty 2012).

3.1.3 Randbedingungen aus dem Produktentwicklungsprozess

Im Gegensatz zu den anwendungsrelevanten Zielstellungen werden in diesem Abschnitt quantitative Faktoren genutzt, welche den Rahmen der Entwicklung vorgeben. Aus dem PEP, welcher die Entwicklung der Gesamtfunktion des Produkts über Unterfunktionen in Baugruppen bis zu Einzelteilen abdeckt, lassen sich Entwurfsgrößen entnehmen, welche zu berücksichtigen sind. Mitunter können diese Daten ebenso aus bislang entwickelten Modellen, Prototypen sowie Vorentwicklungen entnommen werden. Die folgenden Informationen lassen sich ebenfalls für die Potenzialabschätzung heranziehen.

- Abmaße des Begrenzungsraums BR

Hierunter sind Länge L_{BR} , Breite B_{BR} und Höhe H_{BR} des Begrenzungsraums festzulegen. Diese lassen sich aus den Verbindungs- und Anschlussflächen extrahieren, welche im Sinne der Funktions- und Wirkflächensynthese nach Phase II der Entwicklungsmethodik bekannt sind (vgl. Abbildung 9, S. 31). Ferner können vorhandene, konventionelle Konstruktionen verwendet werden. In Anbetracht der Einstellung finaler Funktionsflächen ist in diesem Begrenzungsraum Aufmaß für eine konventionelle Nachbearbeitung inbegriffen.

- Bauteilvolumen V [mm³]
Das Volumen, welches aus dem konventionellen Bauteil oder der konsolidierten Baugruppe herrührt, ist hierbei anzugeben. Ferner kann dies aus dem Zielgewicht in Verbindung mit der konventionellen Legierung oder anteilig mithilfe des Begrenzungsraumes ermittelt werden.
- Funktionsfläche A_F [mm²]
Dies umfasst die Summe aller Wirk- und Funktionsflächen, welche Form- und Lageanforderungen aufweisen. Flächen, deren Funktion im wie-gebaut Zustand erfüllt werden, wie beispielsweise Kühlkanäle, sind ausgeschlossen.
- Gesamtoberfläche A_O [mm²]
Diese entspricht der Summe aller Einzelflächen eines Bauteils oder der verbleibenden Gesamtoberfläche konsolidierter Bauteile abzüglich der Verbindungsflächen. Ist die Gesamtoberfläche nicht direkt messbar, sind Abschätzungen über den BR, einer geometrisch angepassten Grundform und dem Volumen möglich.
- Konventionelle Legierung
Mithilfe dieser Angabe ist eine Vergleichsgrundlage für den Materialwechsel gegeben.
- Additive Legierung
Neben der Verfügbarkeitsprüfung der nutzbaren Legierung für das EBM lassen sich durch Vergleiche zur konventionellen Legierung Optimierungspotenziale abschätzen. Für die Anwendung der Potenzialbewertung werden die verfügbaren EBM-Legierungen vorgegeben.

3.1.4 Berechnungen des Potenzials

Aus den quantitativen Faktoren lassen sich dimensionslose Werte errechnen, welche die Umsetzbarkeit der in Abschnitt 3.1.2 definierten Aspekte widerspiegeln. Tabelle 1 stellt die Berechnungsgrößen und deren Ergebnisinterpretation dar. Die entsprechenden relativen Bewertungen des jeweiligen Potenzials sind Erfahrungswerte und deren Schwellen iterativ an mehreren Beispielbauteilen bestimmt worden.

Tabelle 1 Potenziale des EBM, deren Berechnung und Bewertung

Potenziale	Berechnung	Bewertung des Potenzials
Grad der Gestaltungsfreiheit (GGF)	$GGF = \frac{A_F}{A_O}$	Werte $\leq 0,2 = 100 \%$, Werte $> 0,5 = 0 \%$, Werte 0,2 bis 0,5 linear interpoliert
Leichtbau-grad (GL)	$GL = 80 \% \cdot \frac{m_{konv}}{m_{add}} + 20 \% \cdot GGF$	Werte $> 1/3$, Gewichtseinsparung = 100 %, Werte ≤ 0 , Gewichtseinsparung = 0 %, dazwischen linear interpoliert Potenzial für Strukturleichtbau
Grad der Materialeffizienz (GME)	$GME = \frac{V}{L_{BR} \cdot B_{BR} \cdot H_{BR}}$	Wert gegen 0 = 100 % Wert 1 = 0 %, dazwischen linear interpoliert
Grad der Verfahrenspotenzialnutzung (GP_{EBM})	$GP_{EBM} = \frac{P_{EBM, gewählt}}{P_{EBM, gesamt}}$	Keine Verfahrenspotenziale gewählt = 0 %, alle Verfahrenspotenziale gewählt = 100 %, dazwischen linear interpoliert

Die Werte der Masse für die bislang verwendete Legierung m_{konv} resultiert aus dem Volumen und der Materialdichte. Zur Bestimmung der Masse mit der additiven Legierung m_{add} lassen sich Festigkeitswerte wie Dehn- oder Streckgrenzen der konventionellen und additiven Legierungen σ_{konv} und σ_{add} bei gleichbleibenden äußeren Lastvektoren auf das System **F** über die mechanische Spannung nach Gleichung (3.1) in ein Verhältnis setzen. Anstelle des Querschnittes, auf welchem die entsprechenden Größen per Definition bezogen werden, sind die Volumina V_{konv} und V_{add} nutzbar.

$$\mathbf{F} = \text{konstant} = \sigma_{konv} \cdot A_{konv} = \sigma_{add} \cdot A_{add} \approx \sigma_{konv} \cdot V_{konv} = \sigma_{add} \cdot V_{add} \quad (3.1)$$

Die Volumenänderung ergibt in Verbindung mit der Dichte die neue Masse m_{add} nach Gleichung (3.2).

$$m_{add} = V_{konv} \frac{\sigma_{konv} \cdot \rho_{add}}{\sigma_{add}} \quad (3.2)$$

Diese Überschlagsrechnung ist fehlerbehaftet und führt zu einem geringeren Volumen als die reine Querschnittsbetrachtung. Da hierbei jedoch Struktur- und

Fertigungsleichtbau unberücksichtigt bleiben, woraus ebenfalls weitere Volumenreduktionen zu erwarten sind, kann der Fehler zur Kompensierung vernachlässigt werden. Die Möglichkeit zum Strukturleichtbau ist mit 20 % des Grades der Gestaltungsfreiheit GGF im Zuge des Leichtbaugrades beziffert. Je höher der Anteil an funktionalen und damit unveränderlichen Oberflächen erscheint, desto eingeschränkter sind die Möglichkeiten des Strukturleichtbaus. Ein anderer Ansatz der Abschätzung einer Volumenreduktion ist die erfahrungsbasierte Gewichtsreduktion. Hierfür werden mehrere Anwendungen betrachtet und deren durchschnittliche Gewichtseinsparung ermittelt. In Tabelle 17 in Anlage A-6, S. 181 ff. sind hierzu 19 Veröffentlichungen zur Strukturoptimierung für metallpulveradditive Verfahren dargestellt und deren Ergebnisse hinsichtlich Gewichtseinsparpotenzial verglichen. Durchschnittlich beträgt die Gewichtseinsparung 42 %. Bei Eingrenzung der Veröffentlichungen, bei welchen sich ähnliche oder höhere Steifigkeit erzielen ließen, wird eine Gewichtsreduktion von 35 % erreicht.

Der Grad der Materialeffizienz GME entspricht einer Art Ausnutzungsgrad des Werkstoffs. Je geringer das tatsächlich verwendete Volumen im Vergleich zum Begrenzungsraum ist, desto effizienter sind additive Verfahren (Priarone et al. 2016). Abschließend erfolgt die Berechnung des Nutzungsgrades der Verfahrenspotentiale GP_{EBM} (vgl. Abschnitt 3.1.1).

3.1.5 Ergebnis, Handlungsempfehlungen und Validierung

Mit den Wichtungen aus Abschnitt 3.1.2 wird als Ergebnis ein Wert zwischen 0 % und 100 % für die potenzielle Nutzung des EBM als Herstellverfahren WP_{EBM} nach Gleichung (3.3) ermittelt.

$$WP_{EBM} = W_{GGF} \cdot GGF + W_{GL} \cdot GL + W_{GME} \cdot GME + W_{GP_{EBM}} \cdot GP_{EBM} \quad (3.3)$$

Nachfolgend sind Handlungsempfehlungen festgelegt, um das Ergebnis zu interpretieren und einen Ausblick für weitere Schritte zu geben.

- **Ausschlussvariablen**
Im Falle zu großer Bauteilmaße oder einer gewünschten Legierungsauswahl, welche nicht Teil hinterlegter Daten ist, kann EBM nicht als Fertigungsprozess herangezogen werden. Eine Verringerung der Bauteilmaße, mögliche Bauteiltrennungen oder Änderung der Legierung sind zu prüfen.
- **Gesamtergebnis ≤ 50 %**
Die Fertigung mittels EBM ist wenig ratsam, wenngleich nicht ausgeschlossen. Es ist allerdings anzunehmen, dass die konventionelle Fertigung oder ein anderer additiver Prozess effizienter ist.

- Gesamtergebnis zwischen 50 % und 70 %
Die Fertigung mittels EBM ist denkbar. Allerdings ergeben sich keine entscheidenden Vorteile gegenüber anderen Technologien. Der fachliche Austausch mit Verfahrensexperten sowie eine Prüfung der Wirtschaftlichkeit ist für den weiteren Entscheidungsprozess sinnvoll.
- Gesamtergebnis ≥ 70 %
Die Fertigung mittels EBM erscheint für die entsprechende Anwendung in hohem Maße attraktiv. Es ergeben sich entscheidende Vorteile für das EBM. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse sollte durchgeführt werden.

Zur Validierung der Potenzialbewertung sind 12 Bauteile herangezogen worden. Da diese primär in mobilen Anwendungen vorkommen, wurden folgende Wichtungen angenommen: Leichtbau, 3; Gestaltungsfreiheit, 2; Materialeffizienz, 2; Verfahrenspotenziale, 2. Wenngleich die Wichtung letzterer als wichtig angegeben wird, ist bei den Beispielen kein Verfahrenspotenzial (vgl. Abschnitt 3.1.1) ausgewählt worden. In Tabelle 23 in Anlage A-11, S. 198 sind die Ergebnisse der Bauteile mit ausgewählten Daten dargelegt. Als Vergleich erfolgte bei allen Bauteilen eine erfahrungsbasierte, subjektive Bewertung.

Die Potenzialabschätzung liefert bis auf einzelne Ausnahmen vergleichbare Ergebnisse zur subjektiven Bewertung. Zudem ist festzustellen, dass Bauteile, die konventionell über Gussverfahren hergestellt werden, die höchsten Potenziale für EBM aufweisen. In Anbetracht dessen, dass für metalladditive Prozesse sowie Gussverfahren die Funktionsflächen nachzuarbeiten sind und die wirtschaftliche Effizienz direkt proportional zum Materialeinsatz beeinflusst wird, ist dieses Ergebnis logisch.

3.2 Bewertung der Wirtschaftlichkeit des EBM

Ausgehend von den Grundlagen und Gleichungen (A-10.1) bis (A-10.7) in Anlage A-10, S. 196 wird in diesem Abschnitt eine Kalkulation zur Kostenabschätzung für EBM entwickelt. Identisch zur Potenzialbewertung soll die Berechnung zum Zeitpunkt der Prozessauswahl anwendbar sein. In vergleichbaren Modellen ist bereits nachgewiesen, dass zur Abschätzung von Bauteilkosten und Herstellzeit aus konstruktiven Größen das Gesamtvolumen sowie die Bauhöhe ausreichend sind (Kranz 2017; Hartogh und Vietor 2018). Die Bauhöhe ist in Abhängigkeit der Orientierung bekannt. Dennoch stellt diese eine optimierbare Größe für die Kostenkalkulationen dar. Zusätzlich dazu ist die zu erzielende Stückzahl relevant. In Verbindung mit dieser sowie der maximalen herstellbaren Anzahl von Teilen pro Bauzyklus lassen sich die Kosten ermitteln und

optimieren. Der Aufbau der gesamten Kostenkalkulation ist in Abbildung 70, S. 199 in Anlage A-12 dargestellt. Nachfolgend werden die Kalkulationen der Kostenabschätzung beschrieben.

3.2.1 Bauzyklus- und Bauteilherstellungskosten

Die Bauzykluskosten setzen sich aus den Material- und Fertigungskosten K_M und K_F zusammen. Bezogen auf die im Bauzyklus befindliche Anzahl an Bauteilen N ergeben sich die Herstellkosten pro Bauteil K . In Abhängigkeit der Bauraum- und Bauplattengröße lässt sich eine bestimmte maximale Anzahl an Bauteilen N_{max} im Bauraum platzieren. Folglich ist nach Gleichung (3.4) zu unterscheiden, ob die gewünschte Anzahl N_{Ziel} zu verwenden ist oder die maximal mögliche Anzahl N_{max} .

$$K = \frac{1}{N} \cdot (K_M + K_F) \quad (3.4)$$

$$N = \begin{cases} N_{Ziel} & \text{wenn } N_{Ziel} < N_{max} \\ N_{max} & \text{wenn } N_{Ziel} \geq N_{max} \end{cases}$$

3.2.2 Ermittlung der maximalen Bauteilanzahl pro Bauzyklus

Die maximale Anzahl an Bauteilen pro Schicht nach Gleichung (A-10.7), S. 196 kann bestimmt werden, wenn die Bauteile exakt in die vorgesehene Baufläche passen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Bauteile im EBM stapelbar und je nach Anlage und Bauplattform in einem zylindrischen Bauraum fertigbar sind. Ferner bedingt die Betrachtung der Bauteile als Rechteck, bestimmt durch Länge L_R , Breite B_R und Höhe H_R , eine Variantenrechnung in Abhängigkeit der Grundausrichtung. Aus der Fragestellung, wie viele Bauteile in einem Bauraum in Abhängigkeit der Orientierung platziert werden können, ergibt sich ein Optimierungsproblem. Randbedingungen sind hierbei die Berücksichtigung des Bauplattformrandes PL_a und Bauteilabstandes g (vgl. Gleichung (A-10.7), S. 196). Bezogen auf das EBM sind quadratische, rechteckige und kreisförmige Bauplatten möglich. Zur Packungsoptimierung rechteckiger Flächen ist die Methode nach Dowsland nutzbar, um die maximale Anzahl innerhalb eines größeren Rechtecks zu ermitteln (Naujoks 1991; Dowsland 1985).

Bei der kreisförmigen Bauplatte erfolgt die Bestimmung der maximalen Anzahl über einen Viertelkreis und den Satz des Pythagoras nach Gleichung (3.5) bis (3.7). Darin wird ausgehend vom Kreisursprung die Rechtecklänge in horizontaler Richtung a und in vertikaler Richtung b inklusive des jeweiligen Bauteilabstandes g_x und g_y genutzt.

$$(n_k a - g_x)^2 + (k b - g_y)^2 \leq r^2 \quad (3.5)$$

$$a = L_{BR} + g_X \quad (3.6)$$

$$b = B_{BR} + g_Y \quad (3.7)$$

Für jede Reihe k wird die Anzahl an Rechtecken dieser Reihe n_k nach Gleichung (3.8) ermittelt, solange der Radius r nach Gleichung (3.9) nicht überschritten und bis dadurch der Endwert k_e erreicht ist. Dieser ergibt sich aus dem halbierten Bauplattendurchmesser abzüglich des freibleibenden Sicherheitsabstands zum Rand der Bauplatzform PL_a .

$$\sum_{k=1}^{k_e} n_k = \frac{1}{a} \left(\sqrt{r^2 - (kb - g_Y)^2} + g_X \right), \quad k, n_k \in \mathbb{N} \quad (3.8)$$

$$r^2 - (kb - g_Y)^2 > 0 \quad (3.9)$$

Diese Rechnung ist für vier Fälle in Abhängigkeit der Startposition nach Abbildung 11 zu unterscheiden.

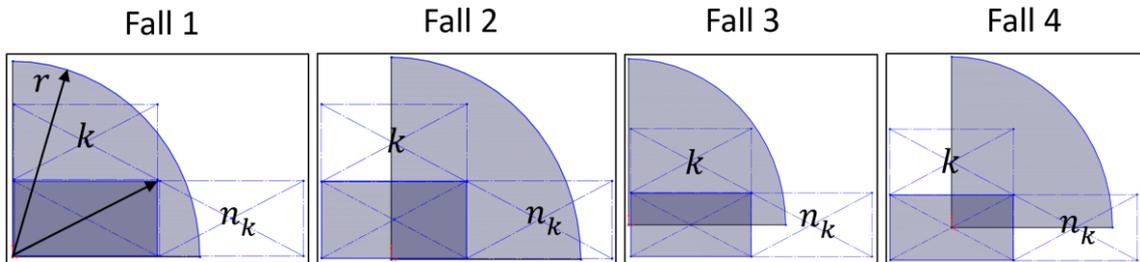


Abbildung 11 Fallunterscheidung aufgrund der Positionierung des ersten Rechtecks

Die maximal mögliche Anzahl an Bauteilen pro Schicht $N_{Ebene\ max}$ errechnet sich für die entsprechenden Fälle nach Gleichung (3.10).

$$N_{Ebene\ max} = 4 \cdot \sum_{k=1}^{k_e} n_k \quad (3.10)$$

Das verbliebene dritte Bauteilmaß bestimmt die Höhe der Bauteilebene H_{Ebene} . Daraus lässt sich die Anzahl an Schichten $N_{Schicht}$ über die gesamte Bauraumhöhe $H_{Bauraum}$ ermitteln. Hierbei ist analog zur Anordnung in der Ebene ein Abstand zwischen den Bauteilebenen und ggf. zur Bauplatzform g_z zu berücksichtigen, um Stützstrukturen einzubringen und das Verschmelzen der Schichten zu vermeiden. Nach Gleichung (3.11) errechnet sich die maximale Anzahl an Bauteilen pro Bauzyklus N_{max} .

$$N_{max} = N_{Ebene,max} \cdot N_{Schicht} = N_{Ebene,max} \cdot \frac{H_{Bauraum}}{H_{Ebene} + g_z} \quad (3.11)$$

Die Variantenrechnungen bei allen drei Grundausrichtungen liefern somit die maximal mögliche Anzahl an Bauteilen pro Schicht und Bauzyklus. Eine Variation der Bauteilausrichtung innerhalb des Bauraums ist untypisch, da ein Mehraufwand an

Datenvorbereitung notwendig wird. Zudem wären andere Materialeigenschaften dieser umorientierten Bauteile möglich (vgl. Abschnitt 2.2.2.1.1).

3.2.3 Material- und Fertigungskosten

Die Materialkosten K_M werden nach Gleichung (3.12) ermittelt.

$$K_M = k_S \cdot k_r \cdot N \cdot C_m \cdot V_{add} \cdot \rho_{add} \cdot 0,000001 \quad (3.12)$$

Das Gesamtvolumen der additiven Gestalt V_{add} lässt sich nach Gleichung (3.1), S. 51 bestimmen oder prozentual vom Ausgangsvolumen abschätzen (vgl. Tabelle 17 in Anlage A-6, S. 181). Die Faktoren k_r und k_S stellen den Mehrverbrauch des Materials aufgrund von Supportstrukturen sowie des nicht vollständig rezyklierbaren und folglich verlorenen Materials dar. 95 % des Restpulvers sind erneut für den EBM-Prozess nutzbar. Die entsprechenden Supportstrukturen beim EBM führen zu einer Volumenzunahme von 10 % bis maximal 20 % des Bauteilvolumens (Kretzschmar et al. 2018).

Die Faktoren k_r und k_S betragen somit 1,1 - 1,2 beziehungsweise 1,05. Die Materialkosten pro Kilogramm C_m unterscheiden sich je nach der Legierung.

Die Kosten für den Fertigungsprozess K_F setzen sich aus den Vorbereitungskosten K_{VB} , der Bauteilnach- und -endbearbeitung K_{NB} sowie dem Bauprozess K_{BP} nach Gleichung (3.13) zusammen (vgl. Abschnitt 2.5.2).

$$K_F = K_{VB} + K_{BP} + K_{NB} \quad (3.13)$$

Die Bauprozessvorbereitung beschreibt den Aufwand von der abgeschlossenen Konstruktion bis zum erstellten, digitalen Bauprozess. Da dies manuell durchzuführen ist, werden Stundensätze inklusive Softwareanteil über die entsprechende Zeitdauer genutzt (vgl. Gleichung (A-10.4), S. 196). Bei mehreren Bauprozessen lassen sich diese Kosten aufteilen, da kein zusätzlicher Aufwand anfällt. Die Kosten für das Maschinenrüsten, -säubern und Einstellen der Steuerung an der Maschine werden hierbei nicht berücksichtigt, da diese ein Teil des Bauprozesses sind und anders wie die Datenvorbereitung für jeden Bauprozess erneut anfallen.

Für die Nach- und Endbearbeitung sind verschiedene Schritte je nach Anforderungen an das Bauteil durchzuführen. Als notwendige Arbeiten und entsprechende Kosten zählen hierbei die Entfernung des Überschusspulvers K_{PE} , das Abtrennen der Teile von der Bauplatte K_{AT} sowie das Entfernen der Stützstrukturen K_{SE} . Optional hingegen sind Kosten für thermische oder chemische Nachbearbeitungsschritte $K_{NB,therm\chem}$, das Einstellen von Form- und Lagetoleranzen $K_{NB,mech}$ sowie mögliche Qualitätssicherungen

oder Funktionsprüfungen K_{QS} . Folglich ergeben sich die Kosten für die Nach- und Endbearbeitung K_{NB} entsprechend Gleichung (3.14). Da die notwendigen Nachbearbeitungsschritte manuell durchzuführen sind, lassen sich diese identisch zur Datenvorbereitung über Lohnkosten nach Gleichung (A-10.4), S. 196 ermitteln. Die Kosten werden bauteilbezogen ermittelt und mit der Stückzahl des Bauzyklusses multipliziert.

$$K_{NB} = N \cdot \left((K_{PE} + K_{AT} + K_{SE}) + (K_{NB,therm\chem} + K_{NB,mech} + K_{QS}) \right) \quad (3.14)$$

Die Bauprozesskosten K_{BP} können über die Anlagen- und Betriebskosten pro Jahr bezogen auf den Bauzykluszeit nach Gleichung (3.15) ermittelt werden.

$$K_{BP} = \frac{T_b + T_{VA}}{T_{Jahr}} \cdot \left(\frac{K_{Anlage}}{t_{Anlage}} + K_{Service} + K_{Energie} + K_{Raum} \right) + T_b \cdot \left(\frac{K_{Kathode}}{t_{Kathode}} + K_{HeP} \cdot (M_{HeP} + M_{HeK}) \right) + K_{VM,sonst} + K_{AE} \quad (3.15)$$

Im Vergleich zur Berechnung für die laserbasierte Fertigung (vgl. Gleichung (A-10.5), S. 196) wird Gleichung (3.15) um folgende Variablen ergänzt beziehungsweise ersetzt.

- Dauer des Vakuumbereitstellens, Aufheizens und Abkühlens der Anlage T_{VA} [h]
- Kosten für die Kathode $K_{Kathode}$ [€]
- Lebensdauer der Kathode $t_{Kathode}$ [h]
- Kosten des Heliums im Bauprozess K_{HeP} [€/l]
- Menge des eingeleiteten Heliums im Prozess M_{HeP} [l/h]
- Menge des eingeleiteten Heliums zum Abkühlen M_{HeK} [l/h]
- Dauer und Lohnkosten für das Einrichten der Anlage K_{AE} [€]

Die Energie, welche die Anlage im Bauprozess tatsächlich benötigt, wird im Mittel mit 2,17 kW angenommen (Baumers et al. 2016). Extrapoliert mit den Betriebsstunden T_{Jahr} und den Energiekosten im Tagesmittel von ca. 0,23 €/kWh sowie dem Grundpreis von 134 €/Jahr folgen nach Gleichung (3.16) die Energiekosten pro Jahr.

$$K_{Energie} = 2,17 \text{ kW} \cdot 2000 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}} \cdot 0,23 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} + 134 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \approx 1000 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \quad (3.16)$$

Zur Ermittlung der Generierzeit für das EBM ist die Vorheizzeit jeder Schicht t_V zu berücksichtigen. Daraus folgt die Ermittlung der Generierzeit T_b nach Gleichung (3.17).

$$T_b = \frac{H \cdot (t_B + t_V + t_C)}{3,6 \cdot d_S} + \frac{N \cdot V \cdot k_S}{\dot{S}} \quad (3.17)$$

Die Schmelzrate \dot{S} ist von der Legierung, der Bauteilgestalt sowie der Prozessführung und den Prozessparametern abhängig. Eine detailliertere Aufschlüsselung dieser

erweist sich nicht als zielführend, da diese final durch die Scanlinienerzeugung abhängig der Geometrie innerhalb der Prozessvorbereitung ermittelt wird (vgl. Gleichung (3.2)). Ein nutzbarer Ansatz sind Literatur- und Herstellerangaben entsprechend der Legierung. Für Ti6Al4V beispielsweise entspricht \dot{S} ca. 60 cm³/h (vgl. Tabelle 13, Anhang A-1, S. 171).

Die Vorheizzeit je Schicht t_V ist abhängig von der Größe der zu belichtenden Fläche. Auf Basis dieser wird ein Rechteck aufgespannt, welches den Vorheizbereich umschließt. Die Analyse der Maschinendaten über alle Versuche innerhalb der Arbeit hinweg, zeigt eine durchschnittliche, flächenabhängige Vorheizbereichsdauer von 0,5 ms/mm². Multipliziert mit der Bauteilgrundfläche aus Länge und Breite des Bauteilbegrenzungsraums L_{BR} und B_{BR} sowie der maximalen Anzahl an Bauteilen pro Schicht $N_{Schicht}$ resultiert die Vorheizzeit t_V nach Gleichung (3.18).

$$t_V = 0,0005 \cdot L_{BR} \cdot B_{BR} \cdot N_{Ebene,max} \quad (3.18)$$

Die beispielhafte Umsetzung dieser Kostenabschätzung ist anhand der Demonstratorbauteile zur Topologieoptimierung in Abschnitt 5 durchgeführt worden. Da im Zuge dessen ein Vergleich der tatsächlich optimierten und des nach Gleichung (3.1), S. 51 abgeschätzten Volumens durchgeführt wird, sei auf Abschnitt 5.4 verwiesen.

4 Erarbeitung geometrischer Grenzen des EBM

Dieser Abschnitt umfasst die Festlegung des Geltungsbereichs, Beschreibung der Mess- und Auswertestrategien und die experimentelle Erarbeitung der Gestaltungsempfehlungen für EBM.

4.1 Geltungsbereich der Gestaltungsempfehlungen

Wie die im Abschnitt 2.4 gesammelten Recherchen zeigen, unterscheiden sich Ergebnisse zu herstellbaren Geometrien bei scheinbar ähnlichem Versuchsinhalt stark. Es ist anzunehmen, dass bestimmte Parameter versuchsreihenspezifisch festgelegt wurden und systematische Beeinflussungen in den Messreihen erzeugen. Da diese nicht ausgeschlossen werden können, sollten die Parameter zur Erkennung entsprechender systematischer Fehler festgelegt werden und konstant bleiben. Daher werden zu Beginn des Kapitels Einschränkungen und Limitationen zusammengefasst, die den Geltungsraum der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Empfehlungen darstellen.

Aus den beschriebenen Prozesseigenheiten (vgl. Abschnitt 2.2.1) sowie den daraus folgenden Einflussfaktoren auf die Fertigung (vgl. Abschnitt 2.2.2) ergibt sich ein erweitertes Ursache-Wirkungs-Diagramm für das zu untersuchende MAPS nach Abbildung 64, S. 179 in Anlage 0. In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Einflussgrößen definiert, die Auswirkungen auf die Herstellbarkeit mittels EBM haben.

4.1.1 Ausgangswerkstoff

Entsprechend Abschnitt 2.2.2.2 hat das Ausgangsmaterial und folglich die genutzte Legierung Einfluss auf die Bauteilgestalt. Untersuchungen, welche im Zuge der vorliegenden Arbeit veröffentlicht wurden, bestätigen dies und zeigen unterschiedliche Ergebnisse für herstellbare Strukturen bei der Nutzung einer Stahl- und Titanlegierung (Jurisch et al. 2018).

Im Zuge der Arbeit ist für alle Versuche die Titanlegierung Ti6Al4V verwendet worden. Titan und dessen Legierungen sind Metalle, die besonders vorteilhafte Eigenschaften besitzen. Dazu zählen die Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität des Titanwerkstoffes, welche durch den EBM-Prozess bestehen bleiben, sowie die hohe spezifische Festigkeit der Legierung (Abdeen und Palmer 2016; Donachie 2010). Für Ti6Al4V beträgt dieser Wert nach entsprechender Norm rund 200 Nm/g (ASTM F 2924).

Ti6Al4V besitzt ein zweiphasiges Gefüge, wodurch die Material- und Bauteileigenschaften durch Wärmebehandlung einstellbar sind (Steinhilper und Rieg 2012; Murr et al. 2009; Herzog et al. 2016). Hier bietet der EBM-Prozess durch Vorheizen des Pulverbettes die Möglichkeit im Zuge des Bauprozesses direkt Einfluss auf die Gefügeausbildung zu nehmen. Die chemischen und mechanischen Spezifikationen für den Pulverwerkstoff sind in Tabelle 14, S. 171 und Tabelle 15, S. 173 in Anlage A-2 dargestellt (Arcam AB; DIN 17851; DIN 17865; DIN 17864). Für eine weiterführende Darstellung der industriell nutzbaren Vielfalt sowie Nachteile, beispielsweise durch hohe Kosten des Ti6Al4V, sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Girdwood 2017; Donachie 2010; Peters 2007).

4.1.2 Anlagen- und Prozessparameter

Für die Untersuchungen werden die EBM-Anlagen Arcam A2X und Arcam Q20plus, im Folgenden teils ausschließlich ‚A2X‘ und ‚Q20plus‘ genannt, herangezogen. In Tabelle 2 sind die grundlegenden Parameter aufgeführt. Für eine detaillierte Betrachtung aller Eingabeprozessparameter im Zuge der Arbeit sei auf Tabelle 26 in Anlage A-13, S. 203 verwiesen. Die darin dargestellten Festlegungen wurden für alle Untersuchungen genutzt, solange keine Änderungen der Parameter aufgeführt werden. Die Auswahl der Parameter entspricht dem Standardprozessparametersatz der jeweiligen Anlage zur Prozessierung von Ti6Al4V. Anwendung finden ausschließlich Preheat-, Melt- und Wafer-Themen. Prozessführungen, welche beispielsweise bei Gitterstrukturen Anwendung finden, sowie reine kontur- oder flächenfüllende Prozessabläufe werden nicht untersucht. Zudem ist im Sinne der Anwendung die Nutzung der automatischen Strahlführung ermöglicht.

Tabelle 2 Grundlegende Maschinenparameter der Versuchsanlagen

Bezeichnung	Arcam A2X	Arcam Q20plus
Bauraum X × Y × Z [mm]	200 × 200 × 380	Ø 350 × 380
Material; Bauplattformgröße X × Y × Z [mm]	Stahl; 200 × 200 × 10	Stahl; Ø 320 × 10 oder 210 × 190 × 10
Softwareversion	3.2.121	5.0.41
Verwendete Prozessthemen	Preheat, Melt, Wafer	Preheat, Melt, Wafer
Nominale Vorheiztemperatur	730° C	750° C
Verwendete Scanstrategie	Kontur- vor Flächenfüllung	Kontur- vor Flächenfüllung
Schichtdicke	50 µm	90 µm

Alle Prozesse sind unter den typischen 0,02 mbar Vakuum durchgeführt worden. Die Bauplatte mit den Bauteilen und dem unverschmolzenen, angesinterten Überschusspulver wurde anschließend von der Anlage in das Pulveraufbereitungssystem transportiert und unter Eigenpulver abgestrahlt. In Tabelle 3 sind die Skalierungsfaktoren der jeweiligen Versuchsanlagen für Ti6Al4V beschrieben. Solang nicht anders beschrieben, werden die Faktoren für die gesamte Versuchsreihe angewendet.

Tabelle 3 Skalierungsfaktoren der EBM-Anlagen

Anlage	Skalierungsfaktoren entlang der Maschinenkoordinaten		
	X	Y	Z
A2X	1,0092	1,0092	1,0132
Q20plus	1,008	1,008	1,008

Die Demonstratoren sind iterativ, ausgehend von den Ergebnissen der jeweils vorangegangenen Erkenntnisse entwickelt worden, um die Einflüsse des EBM-Prozesses auf bestimmte Zielgrößen zu isolieren. Die Auswahl bestimmter maßlicher Grenzwerte innerhalb der Demonstratoren ist demnach erfahrungsbasiert.

4.2 Mess- und Auswertestrategien

Grundlegend ist per Definition der additiven Fertigung davon auszugehen, dass bei einer entsprechenden Messaufgabe ein digitales Modell zugrunde liegt. Dieses lässt sich zu Vergleichszwecken mit den additiv hergestellten Geometrien heranziehen.

Die Anwendung der Mess- und Erfassungsstrategien ist von mehreren Faktoren der Testgeometrie wie Form, Größe, Material und Farbe sowie den Umgebungsbedingungen wie beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit, Lichtverhältnisse, Spiegelungen oder anderen möglichen Fehlerquellen abhängig. Zudem ist das Ziel der Messung und die zu erzielende Genauigkeit ausschlaggebend für die Wahl des Messverfahrens. In Bezug auf die additive Fertigung gibt die DIN EN ISO ASTM 52902 einen Überblick, welche Haupteigenschaften von Testkörpern mit welchen Messstrategien erfasst werden können. Ferner sind diese nach der Komplexität beziehungsweise dem Aufwand der Anwendung unterteilt (DIN EN ISO ASTM 52902). Je nach Messverfahren, Datenaufbereitungs- und Auswertemethode können unterschiedliche Ergebnisse resultieren. Im Folgenden werden die Mess- und Auswerteverfahren definiert, welche zur Ermittlung bestimmter geometrischer Grenzen Anwendung finden.

Taktile Messverfahren bleiben weitestgehend unberücksichtigt. Grund hierfür sind die zu erwartenden hohen Rauheiten des EBM sowie die niedrige Auflösbarkeit durch eine geringe Anzahl an Antastpunkten. Optische sowie volumetomografische Messverfahren kommen in Abhängigkeit der Anwendbarkeit zum Einsatz. Tabelle 4 ordnet die jeweilige Messmethode den geometrischen Demonstratoren zu. Für die Beurteilung der Anwendbarkeit dieser Messverfahren sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Hofmann et al. 2015).

Tabelle 4 Zuordnung der Messstrategien zu den jeweiligen Demonstratoren

Messverfahren	Optisch / 3D-Scan	Volumetomografisch / Computer Tomografie (CT)
Messgerät	GOM Atos Triple Scan	Werth TomoScope und GE v|tome|x
Demonstratoren		
<ul style="list-style-type: none"> • Bauraumdemonstrator • Geometriedemonstrator • Pulverentfernung • Überhangcharakteristik • Supportgestalt 	<p style="text-align: center;">Ja</p> <p style="text-align: center;">Auszugsweise</p> <p style="text-align: center;">Auszugsweise</p> <p style="text-align: center;">Ja</p> <p style="text-align: center;">Ja</p>	<p style="text-align: center;">Nein</p> <p style="text-align: center;">Ja</p> <p style="text-align: center;">Nein</p> <p style="text-align: center;">Nein</p> <p style="text-align: center;">Nein</p>

4.3 Allgemeine Verfahrensgenauigkeit innerhalb der Anlage

Zur Erarbeitung der allgemeinen Verfahrensgenauigkeit werden Demonstratoren genutzt, welche den gesamten Bauraum nahezu vollständig ausfüllen. Diese sind in Abbildung 12 für die Anlagen A2X und Q20plus dargestellt. Da Überlagerungen zwischen Größen-, Positions- und Formabweichungen auftreten können, werden ausschließlich ungekrümmte Flächen verwendet. Dadurch lässt sich der Einfluss aufgrund von Abweichungen der Form weitestgehend ausschließen. Zur Unterscheidung von Positions- und Größenabweichungen sind Prismen als Testkörper genutzt worden. Durch eine möglichst hohe Anzahl von Prismen sollen zufällige und systematische Fehler differenzierbar werden. Bei der Entwicklung der entsprechenden Demonstratoren sind die Mess- und Analysemethoden zu berücksichtigen. Je nach Verfahren ist mit zunehmender Anzahl an Testkörpern und deren Verbindungsstrukturen eine Beeinträchtigung der Aufnahme und Auswertung von Messergebnissen zu erwarten.

Die Demonstratoren besitzen jeweils Stegstrukturen, welche an unterschiedlichen Positionen der Bauplatzform beginnen und überwiegend parallel zur Z-Richtung

verlaufen. An deren Beginn sind diese untereinander verbunden, um Position und Relation zueinander zu erhalten. Beide Demonstratoren besitzen zudem einen zentralen Steg im Koordinatenursprung. Dieser ist jeweils direkt mit den äußersten Messkörpern auf der XZ- und YZ-Ebene in mehreren Höhen verbunden. Dadurch sollen unterschiedliche Anbindungen der Messkörper untersucht werden. Ferner erlauben diese zusammen mit den in unterschiedlicher Höhe endenden Stegen die Messung der Abweichungen entlang der Z-Richtung.

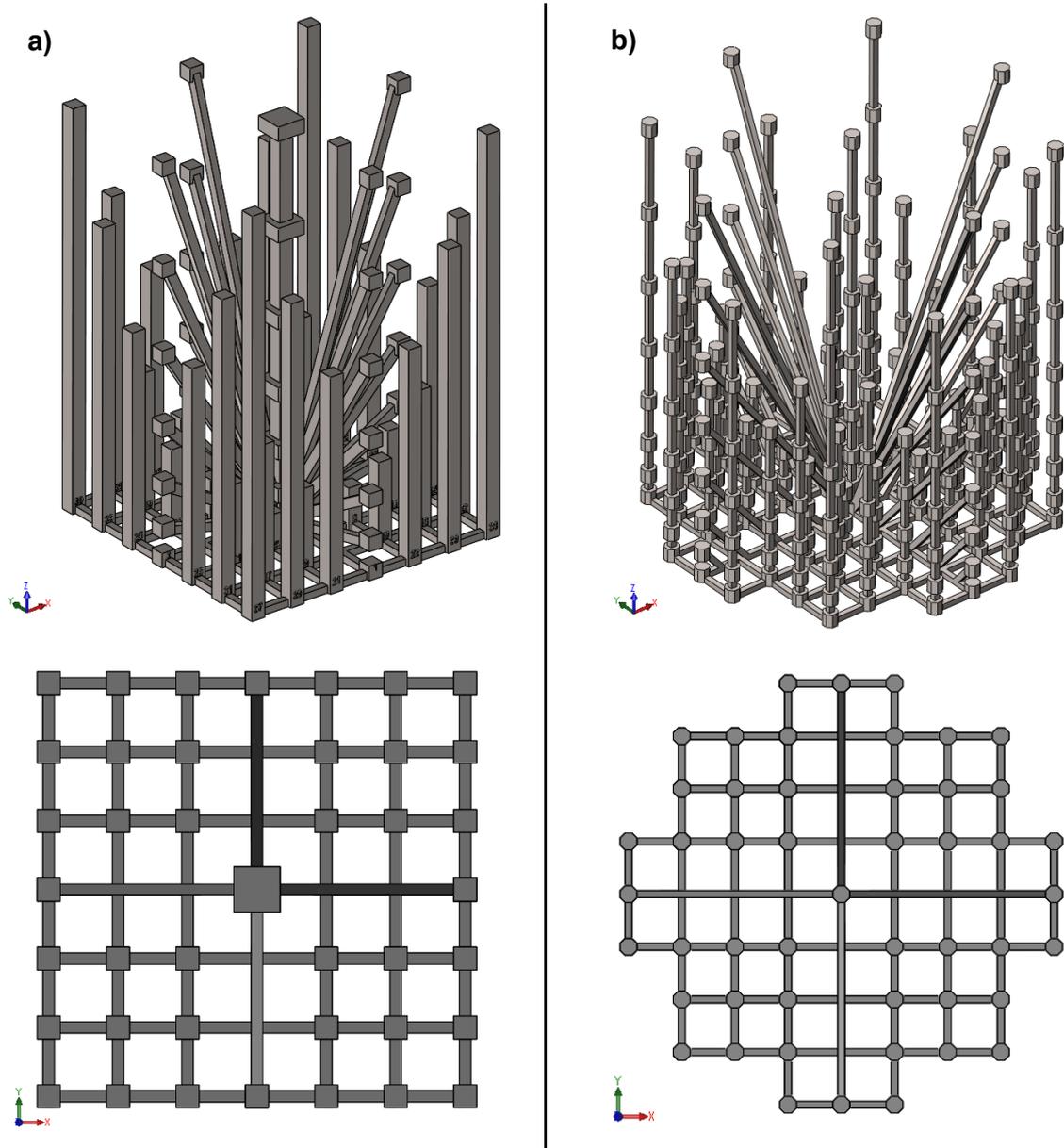


Abbildung 12 Bauraumdemonstratoren in jeweils dreidimensionaler Ansicht (oben) und Draufsicht (unten) der Anlagen a) A2X und b) Q20plus

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Messung beider Bauraumdemonstratoren beschrieben. Hierbei wird zwischen A2X und Q20plus unterschieden. Jeder Demonstrator ist nach Fertigstellung mithilfe des üblichen Pulverstrahlprozesses von

Überschusspulver befreit worden. Supports wurden nicht entfernt. Zur optischen Messung erfolgt eine deckend, matt-weiße Pulverbeschichtung von 8 µm - 15 µm auf den lichtreflektierenden Demonstratoroberflächen.

Im Ergebnis liegen Abweichungen pro Messfläche zur Sollstruktur vor. Durch Kombination der Messergebnisse einer Struktur lassen sich die Größen- und Positionsabweichungen ermitteln. Bezogen auf die Größenabweichung stellen positive Abweichungen die zu groß und negative Werte die zu klein gefertigten Strukturen dar.

Durch Mittelung gegenüberliegender Abweichungen lässt sich die Positionsabweichung ermitteln. Diese ist auf die Messkörperposition zu beziehen. Infolgedessen führen positive Abweichungen im Bereich der Maschinenkoordinaten < 0 zu verringerten Abständen des Messkörpers zum Koordinatenursprung.

Die Betrachtungsweise aller nachfolgend dargestellten Diagramme entspricht den unteren Ansichten in Abbildung 12 mit jeweils zentralem Maschinenkoordinatensystem (vgl. Abbildung 4, S. 20). Der Diagrammtitel signalisiert die jeweilige Abweichungsart und Koordinatenrichtung. Die Diagrammblasen entsprechen der Position des Steges auf der Bauplatte und deren Werte und Größe stellen die richtungsabhängige Abweichung dar. In Anlage A-14, S. 215 ff. sind die Ergebnisse aller Messhöhen und -richtungen beider Bauraumdemonstratoren dargestellt. Die relevantesten Ergebnisse sind nachfolgend für jede EBM-Anlage separat dargestellt.

4.3.1 Abweichungen innerhalb des Bauraums der Anlage A2X

Zur Herstellung des gesamten Bauraumdemonstrators der A2X im vorliegenden Design sind Stützstrukturen notwendig. Aufgrund dieser zusätzlichen Strukturen ist die optische Messung der eigentlichen Strukturen des Bauraumdemonstrators nur eingeschränkt möglich. Mithilfe featurebasierter Überlagerung der Grundfläche des Demonstrators und Best-Fit Einpassung sind die Daten registriert worden. Durch digitale Messtaster in Form eines 5 mm Durchmesserkreises wurden die vier Wände der senkrechten Stege angetastet.

Um den Einfluss über die Bauhöhe darzustellen, werden in Abbildung 13 die Diagramme der Höhen 15 mm, 95 mm und 205 mm gegenübergestellt.

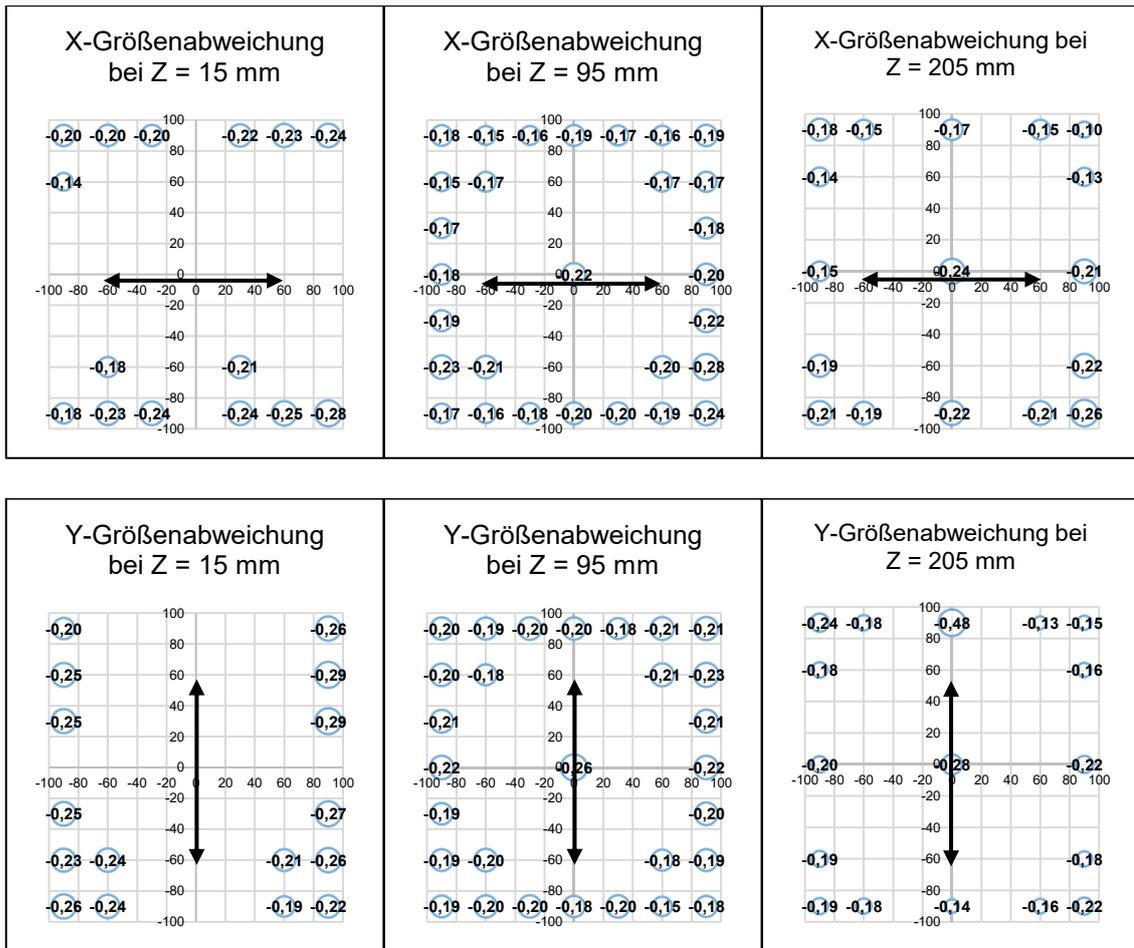


Abbildung 13 Größenabweichungen entsprechend der Koordinatenrichtung des Bauraumdemonstrators der A2X bezogen auf die Bauhöhe

Im Mittel betragen die Abweichung der Größe einzelner Strukturen des Bauraumdemonstrators $-0,23$ mm bei $Z = 15$ mm und $-0,19$ mm bei $Z = 95$ mm sowie 205 mm Bauhöhe. Eine Abhängigkeit der Position und der Bauhöhe dieser Strukturen lässt sich nicht feststellen.

In Abbildung 14 sind die Positionsabweichungen der Stege bezogen auf die konstruierten Positionen entsprechend der Koordinatenausrichtung dargestellt.

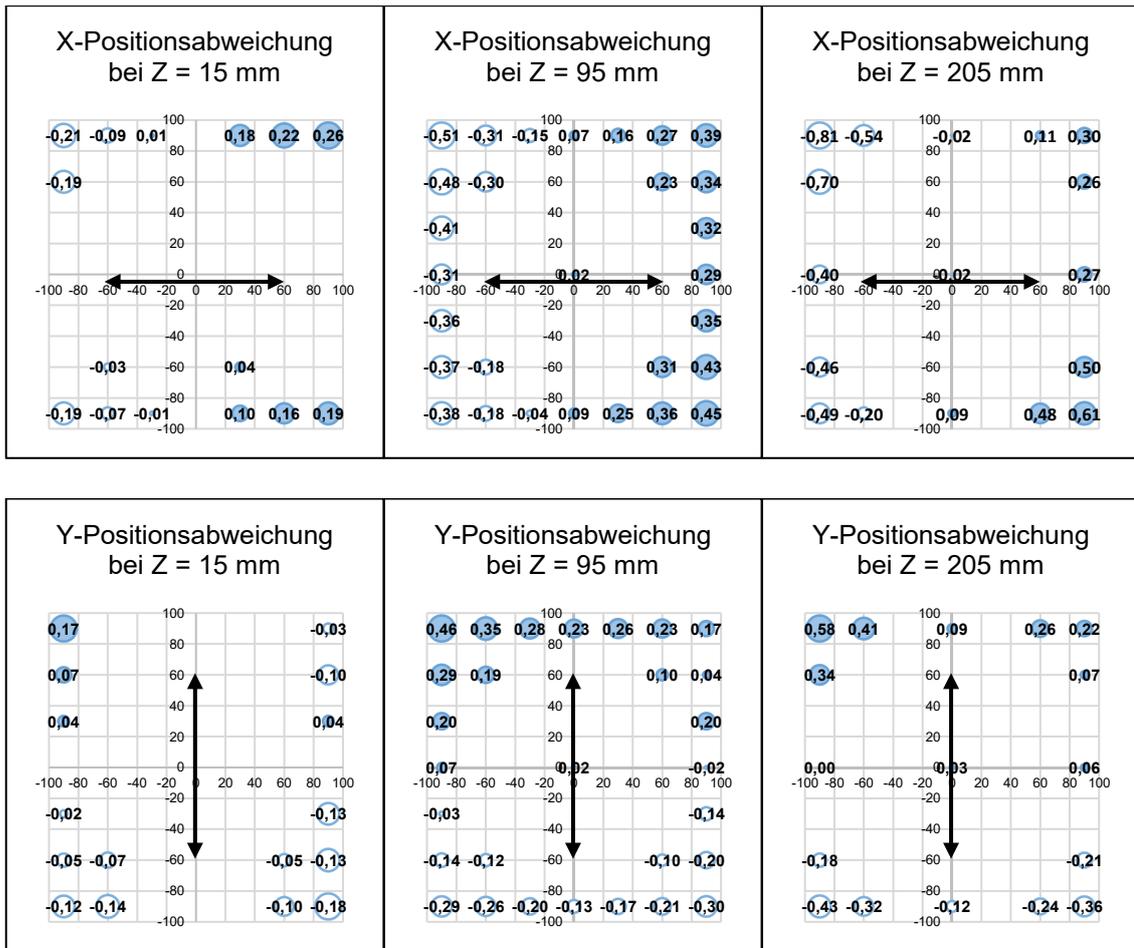


Abbildung 14 Positionsabweichungen entsprechend der Koordinatenrichtung des Bauraumdemonstrators der A2X bezogen auf die Bauhöhe

Die Positionsabweichungen zeigen einen Anstieg mit zunehmendem Abstand zum Koordinatenursprung. Diese sind so gerichtet, dass die Strukturen unabhängig der Raumrichtung jeweils einen zu großen Abstand zum Zentrum aufweisen. Zudem ist hierbei ein Anstieg der Positionsabweichungen mit steigender Bauhöhe sichtbar. Die größten Abweichungen sind für beide Richtungen bei 205 mm Bauhöhe zu finden und betragen im Maximum 0,81 mm bezogen zum Koordinatenursprung. Bei Z = 275 mm, was der höchsten flächig gemessenen Position entspricht, betragen die Abweichung bezogen auf die gesamte Bauraumbreite entlang X- und Y-Achse im Maximum 1,79 mm und 1,21 mm. Die entsprechenden Messwerte sind in Abbildung 15 links und der Verlauf über die Bauhöhe für die jeweils größten Positionsabweichungen in Abbildung 15 rechts dargestellt. Die schwarzen Linien symbolisieren darin den Soll-Strukturverlauf, welcher aufgrund der vereinfachten Visualisierung auf -1 mm und 1 mm anstatt -5 mm und 5 mm relativiert ist.

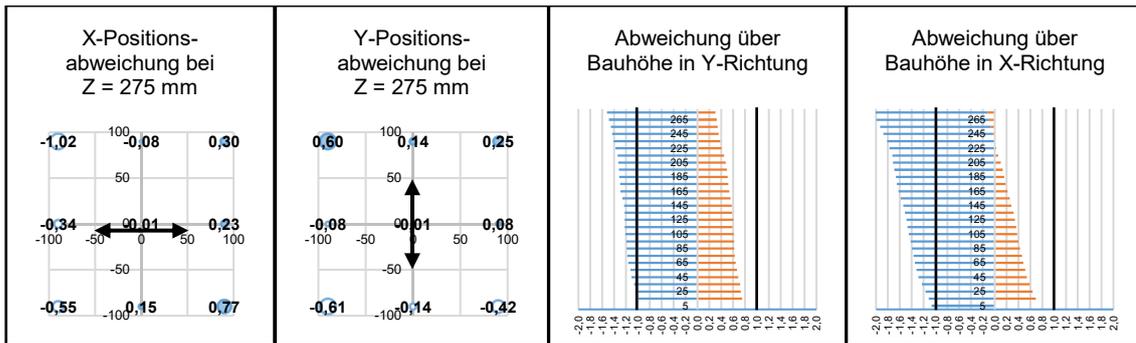


Abbildung 15 Maximale, richtungsbezogene Positionsabweichungen (links) und deren Verlauf über die Bauhöhe (rechts) des Bauraumdemonstrators der A2X

Abbildung 16 zeigt das Ergebnis der Messabweichungen entlang der Z-Richtung in Abhängigkeit der jeweiligen Höhe im Bauraum. Die Abszisse des Diagramms stellt die Bauhöhe und die Ordinate die Abweichungen aller nach oben gerichteten, flächigen Strukturabschlüsse der jeweiligen Höhe zur Sollgeometrie dar. Durch den Graphen werden die gemittelten Abweichungen sowie die Variationen der Messwerte durch Fehlerindikatoren bei der entsprechenden Höhe wiedergegeben. Das Ergebnis zeigt, dass die Strukturen bis zu einer Höhe von 60 mm kürzer sind als dimensioniert. Oberhalb dieses Wertes werden die Strukturen zunehmend größer, wodurch die Abweichungen ab ca. 120 mm Höhe positive Werte annehmen. Im Maximum ergeben sich dadurch Differenzen von -0,7 mm bei 30 mm bis zu +1,8 mm bei 300 mm Höhe. Es ist anzunehmen, dass die Steigung ähnlich bis zur Bauraumgrenze von 380 mm verläuft, wodurch Abweichungen im Mittel von über 2 mm zu erwarten sind.

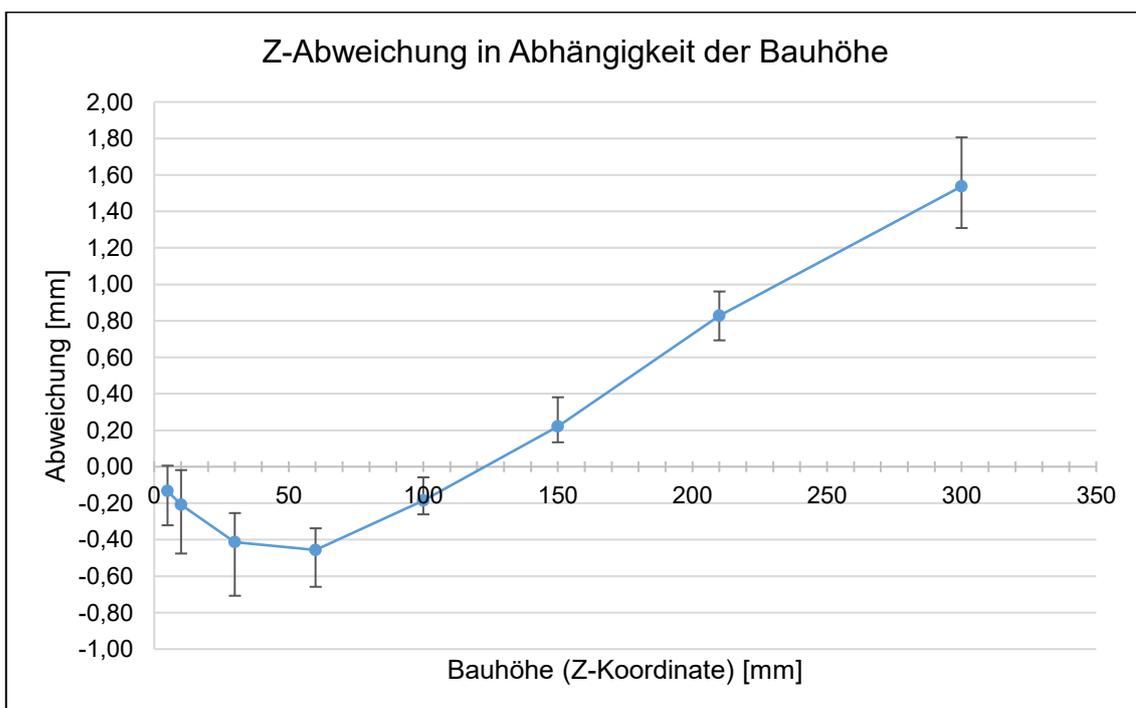


Abbildung 16 Abweichungen der Arcam A2X bei der Höhenmessung bezogen auf die Bauhöhe

4.3.2 Abweichungen innerhalb des Bauraums der Anlage Q20plus

Die Bauhöhe ist aufgrund des hohen Pulververbrauchs derartiger Bauzyklen nominal auf 202,4 mm begrenzt worden. Die Ergebnisse der Abweichungen parallel zur Bauebene wurden identisch zum Bauraumdemonstrator der A2X aufbereitet. Zur Darstellung des Verlaufs abhängig von der Bauhöhe sind die Ergebnisse für die Abweichung in X-Richtung in der Abbildung 17 für die Höhen 8 mm; 88,32 mm und 189,52 mm dargestellt.

Die Größe der Strukturen in X-Richtung innerhalb einer Bauhöhe ist im Bereich der positiven Y-Koordinaten tendenziell größer als dimensioniert. Für die negativen Y-Koordinaten erscheinen die Strukturen ähnlich zur modellierten Größe. Über die Bauhöhe ist der Unterschied gering. Im Maximum befindet sich diese zwischen -0,13 mm und 0,24 mm. Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei der Betrachtung der Y-Abweichungen ab. Die Größenabweichungen betragen hierbei im Maximum -0,13 mm bis +0,36 mm. Im Bereich der negativen X-Werte sind die Körper tendenziell größer als dimensioniert. Für die Körper im positiven Bereich der X-Achse zeigen die Größenabweichungen vernachlässigbar geringe Werte. Der Einfluss der Bauhöhe erscheint hierbei gering.

Die Ergebnisse der Positionsabweichungen sind in Abbildung 18 dargestellt. Anders als bei den Größenabweichungen ist hierbei eine Abhängigkeit zur Bauhöhe erkennbar. Die Positionsabweichungen zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Höhe. Bei $Z = 8$ mm sind die Abweichungen sowohl in X- als auch in Y-Richtung unabhängig deren Position im positiven Bereich bei durchschnittlich 0,09 mm. Mit steigender Bauhöhe ändert sich dies, so dass bei allen freistehenden Strukturen die Distanz zum Koordinatenursprung zu groß erscheint. Im Maximum bei 189,52 mm Bauhöhe liegen die Abweichungen bei -1,45 mm und 1,31 mm für die X-Richtung sowie -1,22 mm und 1,20 mm für die Y-Richtung. Die vereinzelt Körper, die jeweils mit dem Zentrum verbunden sind, zeigen bei gleicher Bauhöhe Positionsabweichungen von -0,04 mm und -0,09 mm in X-Richtung sowie 0 mm und 0,21 mm in Y-Richtung.

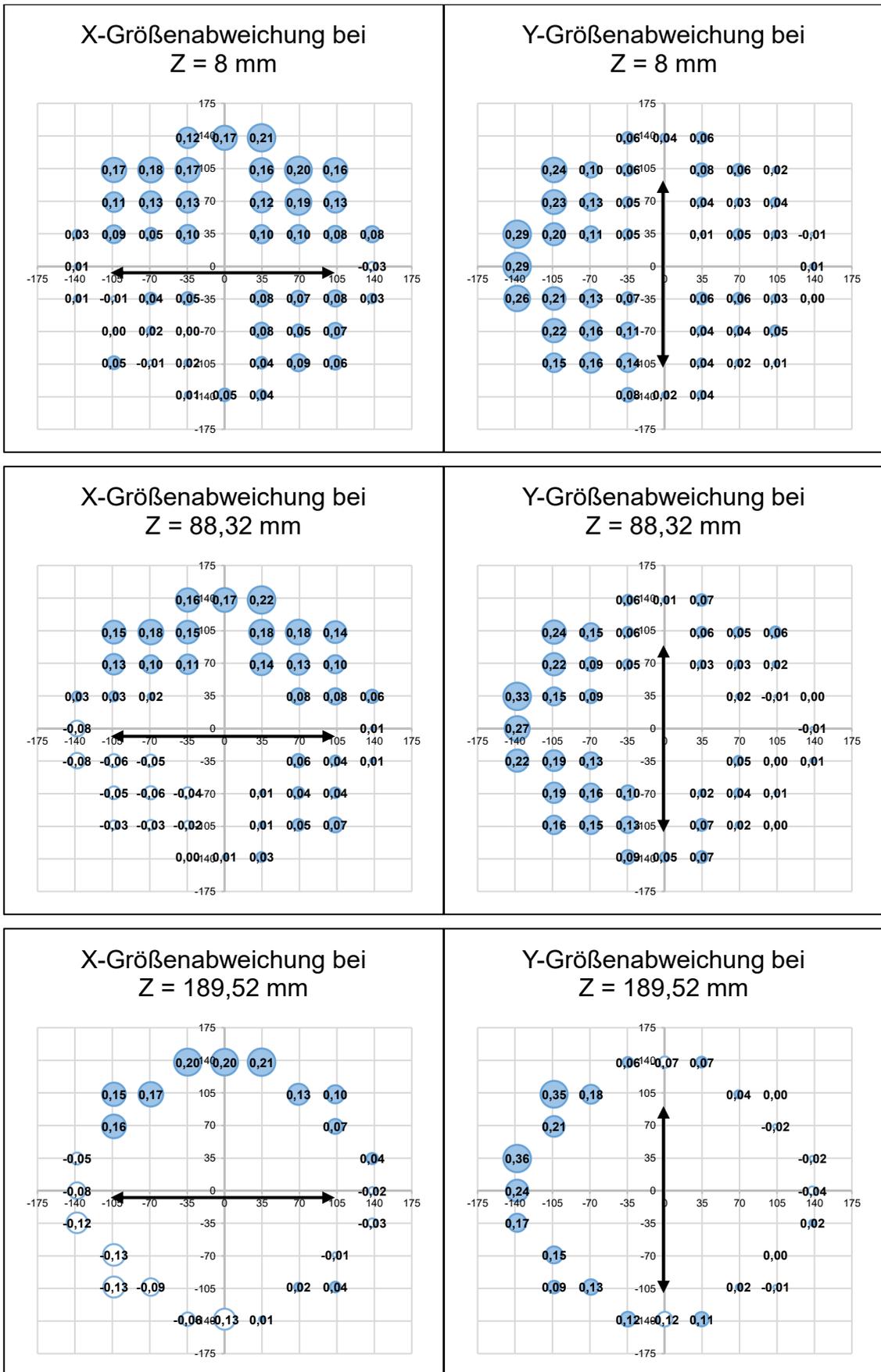


Abbildung 17 Größenabweichungen in X- und Y-Richtung des Bauraumdemonstrators der Q20plus bezogen auf die Bauhöhe

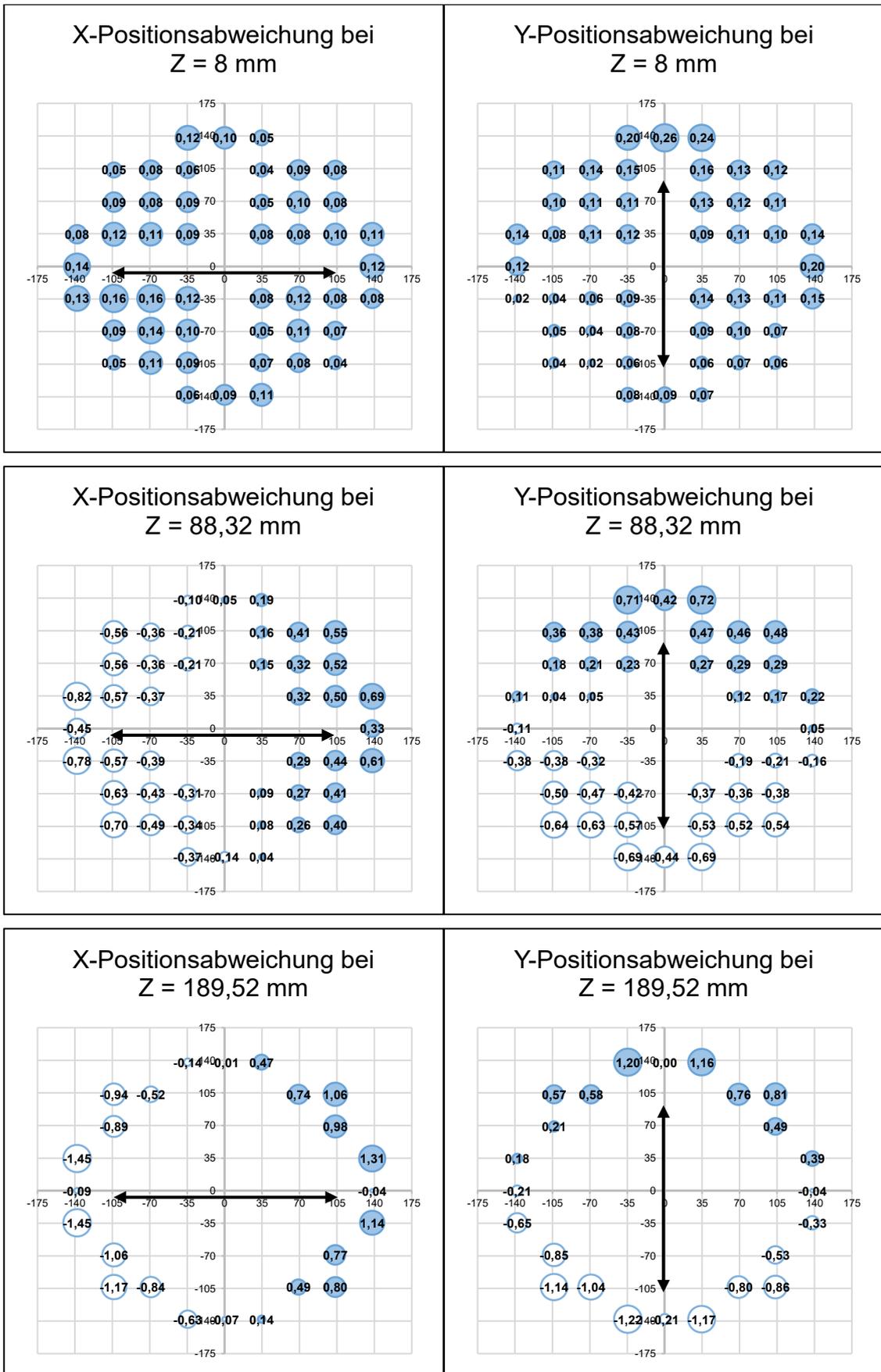


Abbildung 18 Positionsabweichungen in X- und Y-Richtung des Bauraumdemonstrators der Q20plus bezogen auf die Bauhöhe

Durch die Abstufung der Messkörper lassen sich die Ergebnisse der Größen- sowie Positionsabweichung entlang der Z-Koordinate vereinzelt auswerten. Die Messung ist erschwert, da Messflächen uneben erscheinen. Diese weisen Erhöhungen im Bereich der Konturkanten auf. Die Unterseiten erscheinen verformt, wodurch die Fläche in Richtung der Messkörperkante nach oben geneigt ist, was in Abbildung 19 an einem Schnitt der XZ-Ebene dargestellt wird. Darin sind der Verlauf der Messpunkte schwarz sowie die Abweichungen zur Sollstruktur farblich gekennzeichnet. Die entsprechenden Abweichungsarten werden ebenfalls dokumentiert.

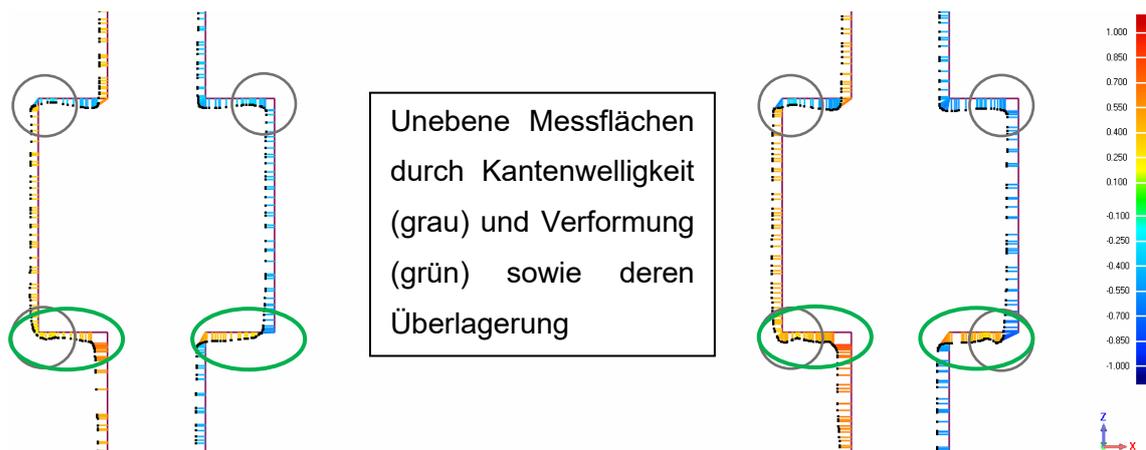


Abbildung 19 Formabweichungen der Messkörper des Bauraumdemonstrators der Q20plus

Die Verformungen, speziell die stetige Erhöhung in Richtung Messkörperkante der Unterseite, lassen sich nur bedingt durch die Auswahl des Messbereichs kompensieren. Zur Vermeidung des Einflusses der Kantenüberhöhungen erfolgt die Extraktion der Messwerte möglichst nahe an der Stegstruktur.

Die Ergebnisse für die resultierenden Größen- und Positionsabweichungen sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Abszissenachse dieser Diagramme beschreibt die Höhe beziehungsweise Z-Richtung, wohingegen die Ordinatenachse die gemittelte Abweichung mit den entsprechenden Fehlerindikatoren darstellt.

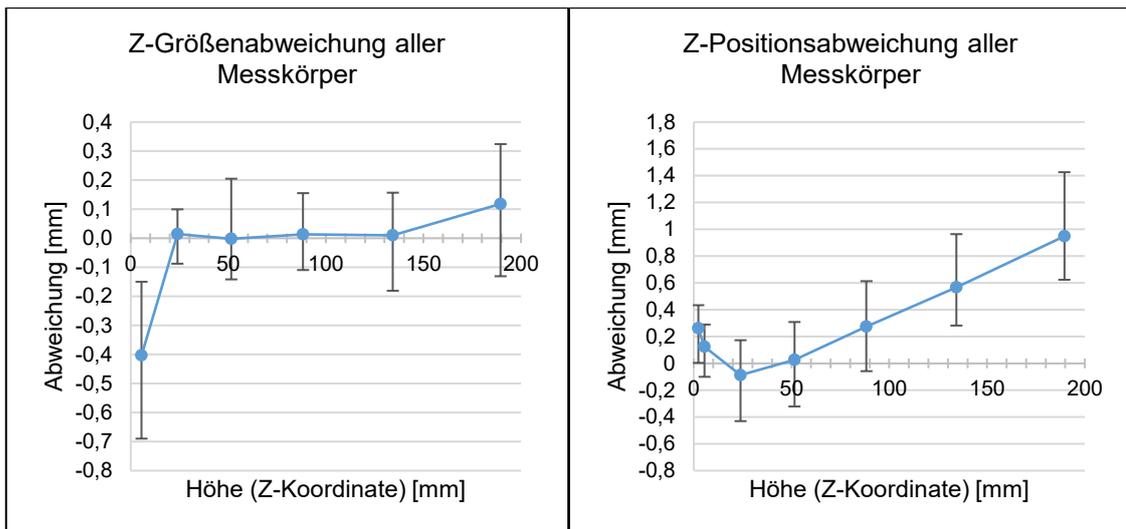


Abbildung 20 Größen- und Positionsabweichungen in Z-Richtung des Bauraumdemonstrators der Q20plus bezogen auf die Bauhöhe

Im Mittel weichen die Größen der Messkörper, die nicht auf der Bauplatte hergestellt wurden, minimal von deren dimensionierter Größe ab und sind überwiegend größer als dimensioniert. Innerhalb einer Ebene schwanken allerdings die Werte um bis zu 0,45 mm. Eine Abhängigkeit der Bauhöhe ist nicht klar erkennbar. Bei Strukturen, welche direkt auf der Bauplatte entstanden sind, betragen die Größenabweichungen im Schnitt -0,4 mm mit Schwankungen zwischen -0,69 mm und -0,15 mm.

Die Positionsabweichungen sind von der Bauhöhe abhängig. Die Distanz der Messkörper ist bis auf die Bauhöhe bei ca. 23 mm jeweils größer als dimensioniert. Der Anstieg der Abweichungen erscheint annähernd linear ab einer Höhe von 50 mm. Es existieren Unterschiede der Positionsabweichungen zwischen den Strukturen, welche mit dem Zentrum verbunden sind und jene, deren Aufbau an separaten Stegen erfolgte. Eine getrennte Darstellung der in Abbildung 20 rechts gemeinsam abgebildeten Ergebnisse erfolgt in Abbildung 21.

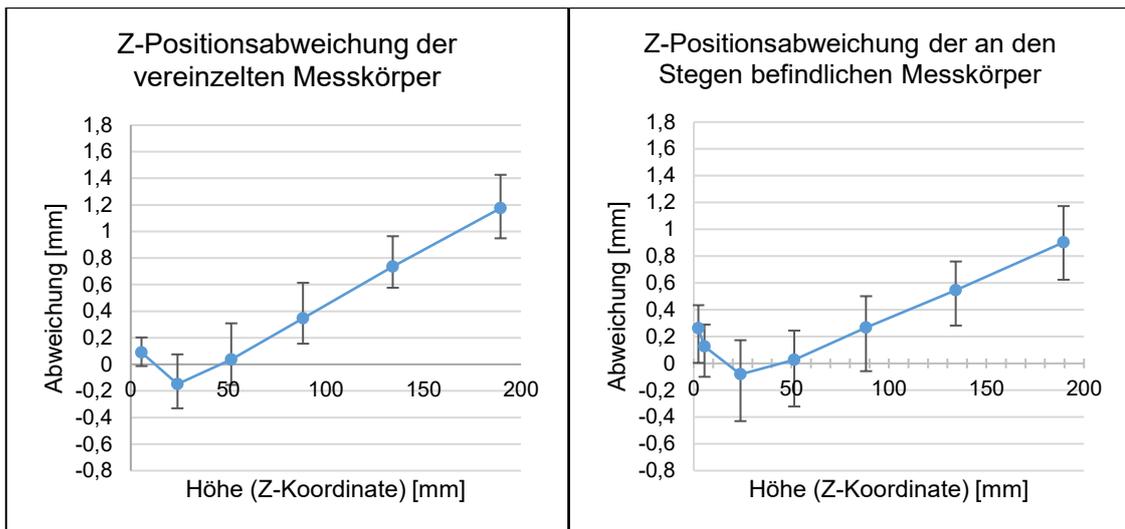


Abbildung 21 Positionsabweichungen der am Koordinatenursprung befestigten Messkörper (links) und der Messkörper der vereinzelt Stegstrukturen (rechts)

Durch die Unterscheidung der Anbindungsart der Messkörper reduziert sich die maximale Abweichung innerhalb einer Ebene auf 0,6 mm. Die einzelnen und mit dem Zentrum verbundenen Messkörper weichen im Mittel um bis zu 1,18 mm und maximal 1,43 mm von der Sollhöhe ab.

4.3.3 Zwischenfazit

Die Ergebnisse der Demonstratoren für den gesamten Bauraum zeigen, dass bestimmte Abweichungen innerhalb des Bauraums für den EBM-Prozess existieren. Diese sind abhängig von folgenden Faktoren.

- Skalierungsfaktoren
- Position der relevanten Körper sowie deren Flächenausrichtungen
- Distanz zwischen den Körpern
- Die Art und der Verlauf möglicher Verbindungsstrukturen

In Abbildung 22 sind die Z-Positionsabweichungen beider Anlagen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass Maßabhängigkeiten entlang der Z-Achse nicht durchweg linear verlaufen. Wenngleich zu Beginn der Bauzyklen bei niedrigen Bauhöhen die Distanzen zwischen den Messkörpern geringer erscheinen, ändert sich dies ab einer jeweiligen bestimmten Höhe. Die Abweichungen werden positiv und steigen linear in Abhängigkeit der Bauhöhe. Infolgedessen ist eine Anpassung der Skalierungsfaktoren denkbar, wodurch allerdings bei geringen Bauhöhen die Abweichungen steigen. Eine Skalierungsfunktion in Abhängigkeit der jeweiligen Bauhöhe kann hierbei zielführend sein.

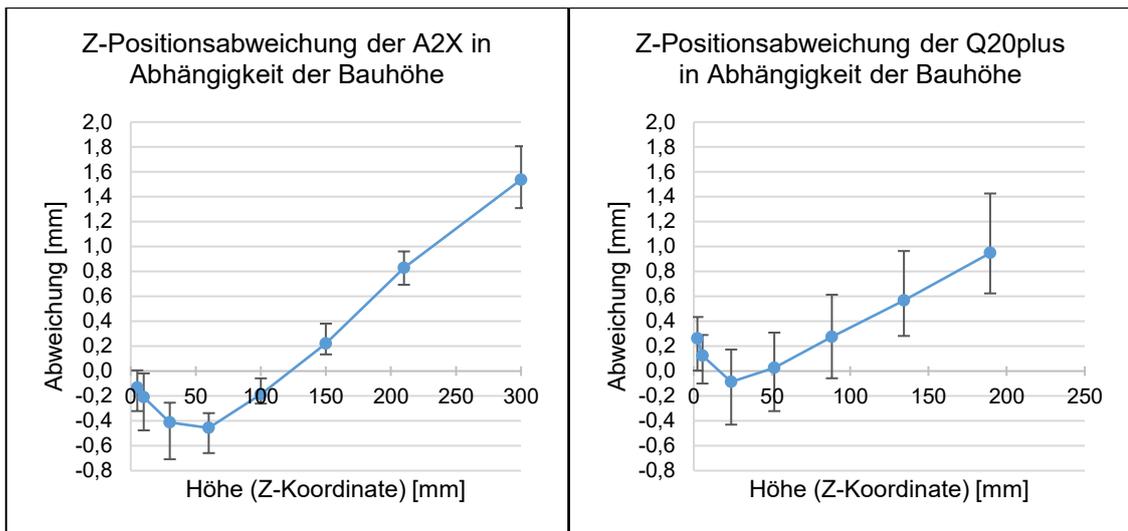


Abbildung 22 Vereinheitlichte Darstellung der Z-Positionsabweichung der Bauraumdemonstratoren der A2X (links) und Q20plus (rechts)

In Tabelle 5 sind abschließend die Werte in Abhängigkeit der Abweichungsart, Anlage sowie Koordinatenrichtung festgehalten. Die Angabe der Ober- und Untergrenzen stellen die Grenzmaße der jeweiligen Mittelwerte dar.

Tabelle 5 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Abweichungen der Bauraumdemonstratoren

		Bemerkungen und Abweichungen in Abhängigkeit der Anlage	
		A2X	Q20plus
Größenabweichung	X	Weitgehend unveränderlich innerhalb einer Ebene und entlang der Bauhöhe; Mittelwert: $-0,19 \begin{matrix} -0,06 \\ -0,32 \end{matrix}$ mm	Variabel innerhalb einer Bauebene und leicht schwankend entlang der Bauhöhe; Mittelwert: $0,05 \begin{matrix} +0,13 \\ -0,22 \end{matrix}$ mm
	Y	Weitgehend unveränderlich innerhalb einer Ebene und entlang der Bauhöhe; Mittelwert: $-0,2 \begin{matrix} -0,06 \\ -0,48 \end{matrix}$ mm	Variabel innerhalb einer Bauebene und leicht schwankend entlang der Bauhöhe; Mittelwert: $0,08 \begin{matrix} -0,12 \\ -0,36 \end{matrix}$ mm
	Z	Aufgrund der Gestalt des Demonstrators ließen sich die Größenabweichungen an einzelnen Messkörpern nicht ermitteln.	Tendenziell leicht positiv, Strukturen auf Bauplatte wesentlich kleiner; Mittelwert freistehender Strukturen: $-0,03 \begin{matrix} +0,16 \\ -0,16 \end{matrix}$ mm Mittelwert der mit der Bauplatte verbundenen Strukturen: $-0,4 \begin{matrix} +0,25 \\ -0,29 \end{matrix}$ mm
Positionsabweichung	X	Direkt proportional mit Abstand zur Y-Achse und Bauhöhe; kein Unterschied bei der Anbindungsart; Max. Distanz X = 180 mm Abweichung Z = 15 mm: 0,47 mm Abweichung Z = 275 mm: 1,79 mm	Abhängig von Anbindungsart und Abstand zur Y-Achse; Abweichung einzelner Stege abhängig von der Bauhöhe; Max. Distanz X = 276 mm Abweichung Z = 8 mm: 0,12 mm Abweichung Z = 189 mm: 2,76 mm
	Y	Direkt proportional mit Abstand zur X-Achse und Bauhöhe; kein Unterschied bei der Anbindungsart; Max. Distanz Y = 180 mm Abweichung Z = 15 mm: 0,35 mm Abweichung Z = 275 mm: 1,21 mm	Abhängig von Anbindungsart und Abstand zur X-Achse; Abweichung einzelner Stege abhängig von der Bauhöhe; Max. Distanz Y = 276 mm Abweichung Z = 8 mm: 0,24 mm Abweichung Z = 189 mm: 2,43 mm
	Z	Vorzeichenvariation von negativer zu positiver Abweichung über die Bauhöhe; Abweichung Z = 30: -0,71 mm Abweichung Z = 300: 1,81 mm	Vorzeichenvariation von negativer zu positiver Abweichung über die Bauhöhe; Abweichung Z = 32: -0,43 mm Abweichung Z = 202: 1,17 mm

4.4 Minimal mögliche Strukturen beim EBM

Der ausgewählte Demonstrator ist ein Probekörper des Rapid Technologie Center (RTC) Duisburg und in Abbildung 23 dargestellt. Dieser verfügt über verschiedene Strukturen, die jeweils einem Konstruktionselement (KE) mit unterschiedlichen Größen und Orientierungen nachempfunden sind. Die KEs stellen Zylinder, Bohrungen¹, Wandungen, Lücken, Überhänge und Radien dar. Mit deren Kombination lassen sich eine Vielzahl von typischen Geometrieverläufen beschreiben und die Ergebnisse bereichsweise auf kombinierte Strukturverläufe übertragen. Für deren detaillierte Beschreibung sei auf Tabelle 27 in Anlage A-15, S. 229 sowie entsprechende Literatur verwiesen (Süß et al. 2016a; Süß et al. 2018b). Dieser Demonstrator ist zweimal in der Arcam A2X, beschrieben mit EBM1 und EBM2, sowie einmal in der Q20plus aufgebaut worden. Zur Beschreibung einzelner Ausrichtungen wird die BE als Referenz genutzt. Entsprechende Winkelangaben beziehen sich auf diese Bauebene (vgl. Abbildung 5, S. 21). In den nachfolgenden Diagrammen beschreiben die Abszissen die jeweilige Featuregrößen und die Ordinaten deren erzielte Messwerte. Der Sollverlauf jedes Features ist in Form einer schwarzen Linie dargestellt, wohingegen die farbigen Linien die jeweiligen erzielten Ergebnisse widerspiegeln.

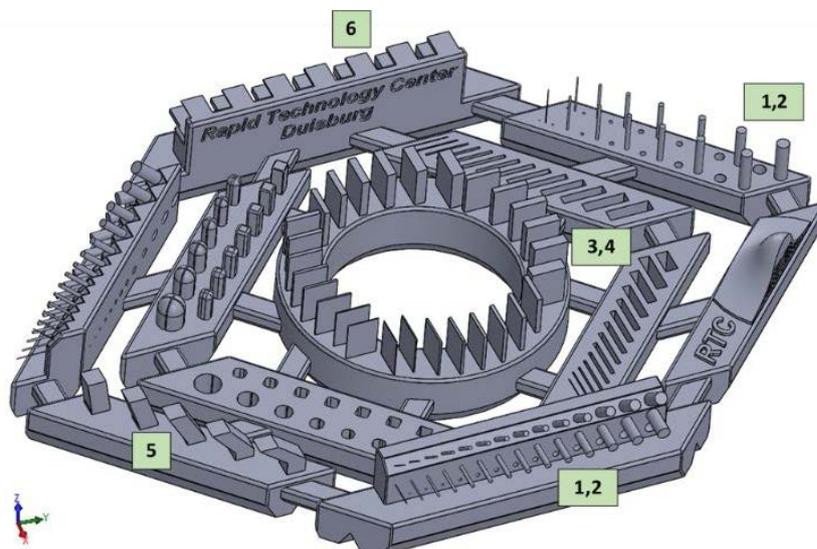


Abbildung 23 Geometriedemonstrator RTC-Probekörper und Nummerierung der Konstruktionselemente

¹ Der Begriff Bohrungen entspricht der Norm DIN EN ISO 52911-1 und beschreibt im Sinne der Konstruktionselemente eine direkt konstruierte und gefertigte, kreisrunde Vertiefung oder einen Durchbruch in einer Struktur. Trotz der Begriffsähnlichkeit sind diese nicht durch Bohren entstanden.

4.4.1 Minimaler Zylinderdurchmesser mit Achswinkel 90° zur Bauebene

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse aller Zylinder des KE1, deren Achse parallel zur Z-Richtung verläuft, dargestellt. In beiden Anlagen wurden alle Zylinder gefertigt. Die Ergebnisse werden anlagenbezogen getrennt dargestellt. Zur Messwertaufnahme sind mehrere Kreisquerschnitte extrahiert und gemittelte Abweichung des Zylinderdurchmessers erfasst worden.

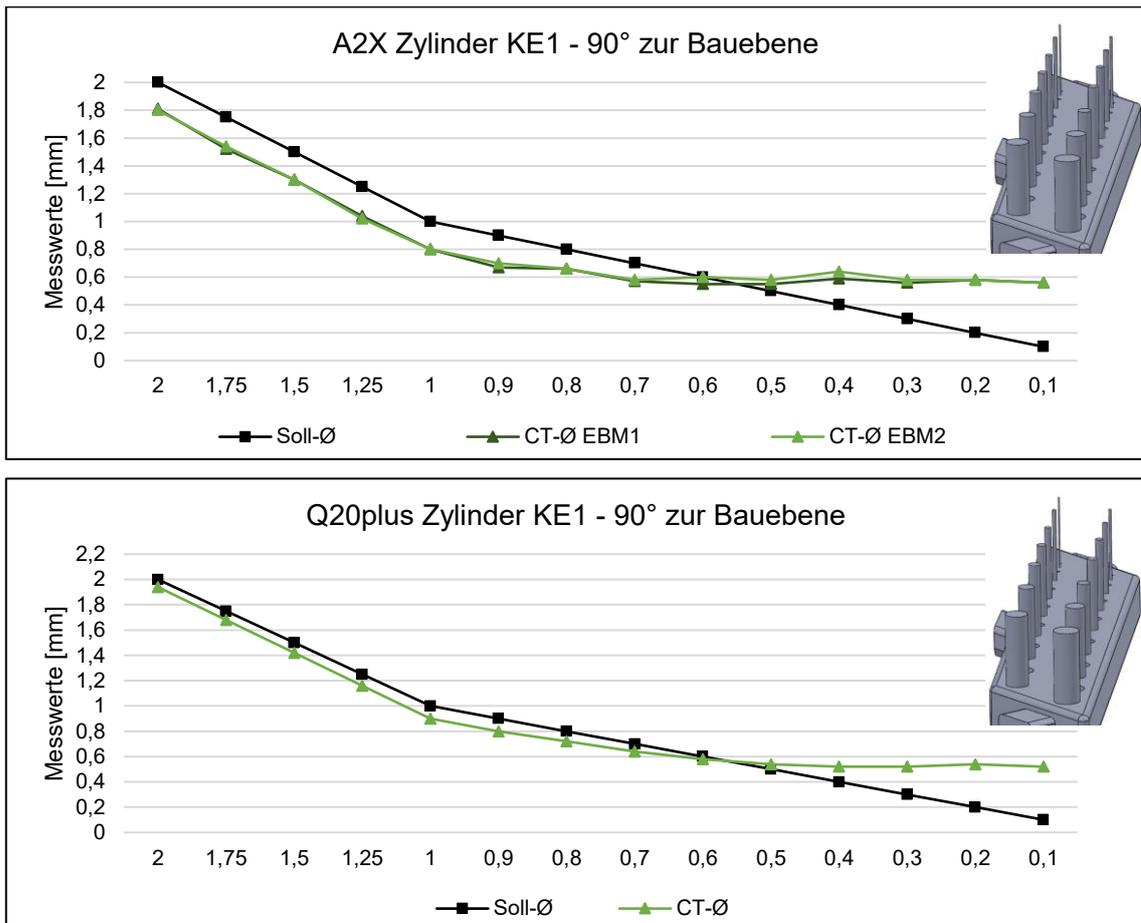


Abbildung 24 Ergebnisse der Zylinder KE1 parallel zur Z-Richtung

4.4.1.1 A2X

Der kleinste gemessene Außendurchmesser D beträgt 0,55 mm. Kleiner gestaltete Zylinder nehmen jeweils dieses Maß an. Die Zylinder oberhalb 0,6 mm Soll Durchmesser besitzen durchgängig geringere Durchmesser als modelliert. Bei Sollmaßen $\geq 0,8$ mm beträgt die Abweichung -0,2 mm.

4.4.1.2 Q20plus

Der kleinste gemessene Außendurchmesser D beträgt 0,52 mm. Identisch zur A2X werden Zylinder unterhalb 0,6 mm Soll Durchmesser nicht schmaler. Die Zylinder mit

modellierten Durchmessern $\geq 0,7$ mm erscheinen schmäler als konstruiert. Die Abweichungen betragen durchschnittlich $-0,08$ mm.

4.4.2 Minimaler Zylinderdurchmesser mit Achswinkel 45° zur Bauebene

Die Ergebnisse der Zylinder im 45° Winkel zur Bauebene sind in Abbildung 25 für beide Anlagen dargestellt.

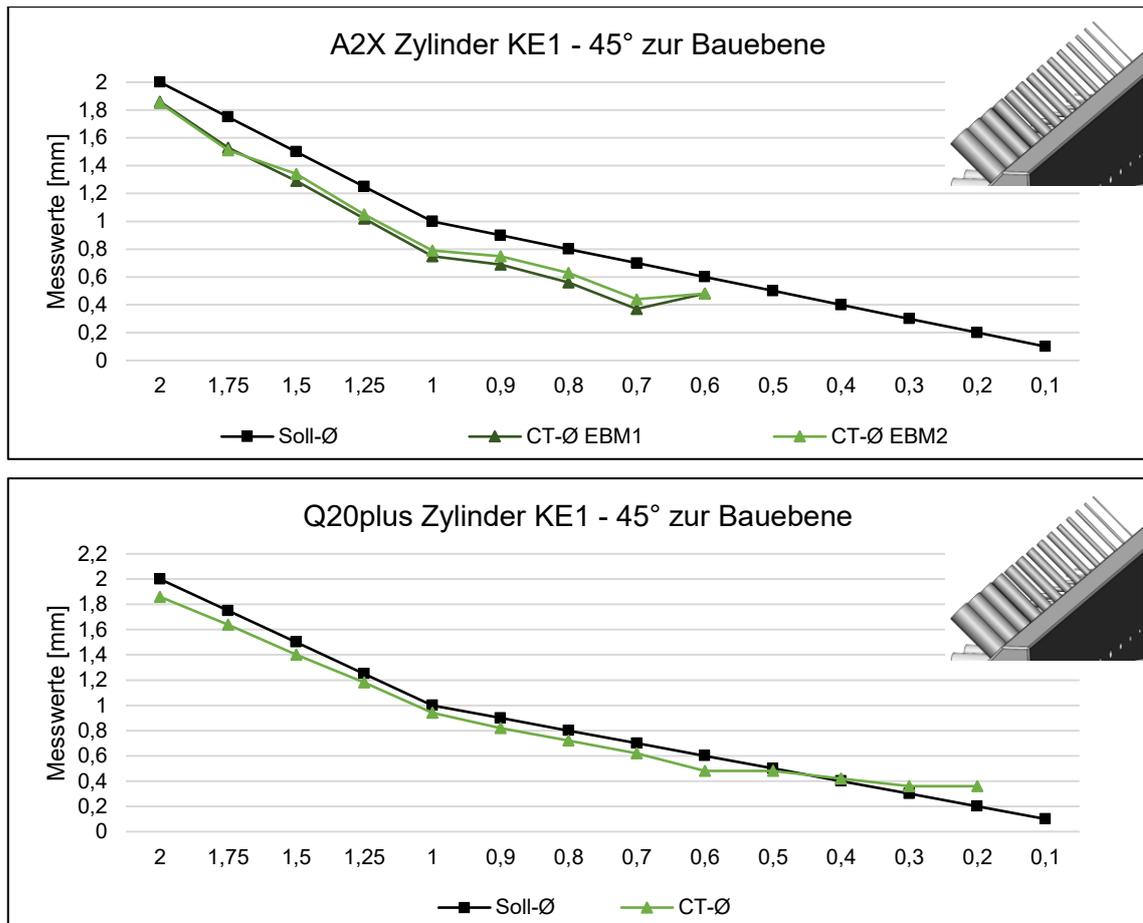


Abbildung 25 Ergebnisse der Zylinder KE1 mit Achswinkel 45° zur Bauebene

Einige Messwerte fehlen in beiden Diagrammen. Die entsprechenden Zylinder konnten nicht erfasst werden, da diese nicht vorhanden waren. Es ist unklar, ob die fehlenden Strukturen nicht gefertigt wurden oder im Zuge der Pulverentfernung nachträglich abbrechen. Allerdings besitzt der Demonstrator an anderer Position vergleichbare Zylinder, die entstanden sind. Demzufolge lässt sich darauf schließen, dass diese generell gefertigt werden. Des Weiteren besitzen alle Zylinder an deren plan modellierter Kopffläche signifikante Formabweichungen. Es entsteht eine Art Erhöhung an der nach oben zeigenden Kante, wie in Abbildung 26 dargestellt. Darin sind die Sollstrukturen grau, die optisch erfassten Geometrien transparent blau und eine beispielhafte

Abweichung rot umrandet dargestellt. Nachfolgend werden die Messergebnisse anlagenspezifisch ausgewertet.

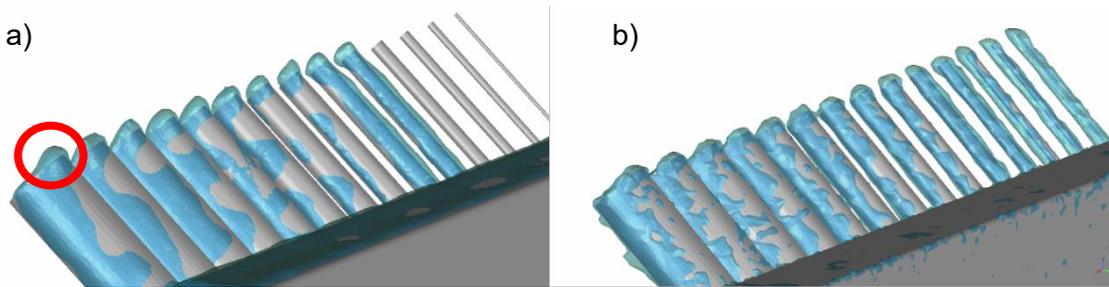


Abbildung 26 Formabweichungen der um 45° geneigten Zylinder eines Demonstrators der a) A2X und b) Q20plus

4.4.2.1 A2X

Die Werte schwanken zwischen beiden Demonstratoren stärker als in Abschnitt 4.4.1.1. Der minimale Durchmesser D beträgt 0,37 mm. Allerdings erscheint dieser Zylinder mit Solldurchmesser 0,7 mm stark elliptisch. Der Zylinder mit Solldurchmesser 0,6 mm, welcher sich kreisrunder abzeichnet, weist einen Wert von 0,48 mm auf. Aufgrund der geringen Datenlage der kleineren Zylinder ist nicht eindeutig klar, ob dies die untere Grenze darstellt. Zylinder $\geq 0,7$ mm sind schmaler als dimensioniert. Die Abweichungen zum Solldurchmesser betragen -0,11 mm.

4.4.2.2 Q20plus

Die Ergebnisse korrelieren weitestgehend mit denen aus Abschnitt 4.4.1.2. Die Messungen zeigen überwiegend Werte unterhalb der Sollmaße ab einem Solldurchmesser $\geq 0,6$ mm. Die Abweichungen zum Sollmaß betragen im Mittel -0,09 mm. Die minimalen Durchmesser liegen bei 0,36 mm.

4.4.3 Minimaler Zylinderdurchmesser mit Achswinkel 0° zur Bauebene

Die Zylinder, deren Achsen parallel zur Bauplatte verlaufen, zählen orientierungsbedingt zu kritischen Überhangstrukturen. Alle Zylinder wurden ohne Stützstrukturen in voller Länge gefertigt. Die Zylindergeometrien beider Anlagen weisen allerdings starke Formabweichungen auf. Deren Erscheinung ist je nach Größe der Zylinder unterschiedlich. In Abbildung 27a sind die Zylinder eines Demonstrators der A2X blau und deren Sollstruktur grau dargestellt. Die transparente, weiße Ebene, welche die Zylinder schneidet, ergibt die Schnittkontur entsprechend Abbildung 27b.

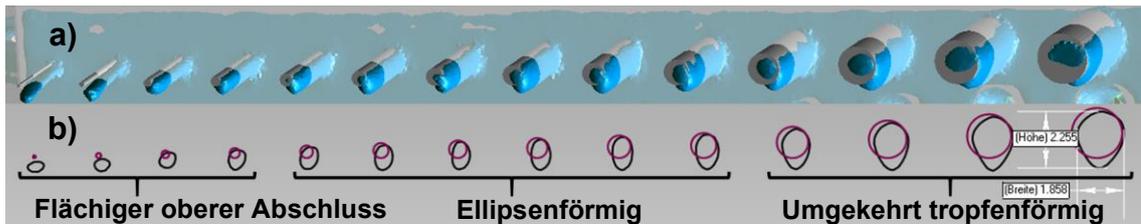


Abbildung 27 Formabweichungen der Zylinder achsparallel zur Bauebene in a) dreidimensionaler Ansicht und b) der Schnittebenenansicht

Zylinder mit einem Soll Durchmesser von 0,5 mm bis 0,9 mm sind ellipsenförmig. Ab 1 mm zeigt sich eine umgekehrte Tropfenform, wobei die grundsätzliche Messabweichung durch die Tropfenspitze, also die Materialzugabe an der Unterseite der Zylinder zu beobachten ist. Bei $D < 0,5$ mm besitzen die Strukturen anstatt der Zylinderform einen annähernd ebenen Abschluss an der Oberseite und ab $D < 0,3$ mm werden diese nicht mehr parallel zur XY-Ebene gefertigt. Da ähnliches Verhalten an beiden Anlagen zu beobachten ist, wird zur Auswertung der Zylinder in Höhe und Breite bezogen zur Baurichtung unterschieden, wie in Abbildung 27b am rechten Zylinder dargestellt.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Ergebnisse werden darauf aufbauend anlagenbezogen beschrieben.

4.4.3.1 A2X

Alle Messungen entlang der Baurichtung, welche die Höhe der Zylinder widerspiegeln, zeigen größere Werte als dimensioniert. Die Abweichungen liegen im Mittel bei 0,36 mm und im Maximum bei 0,48 mm.

Bezogen auf die Breite der Zylinder, welche die Messung des Durchmessers parallel zur Bauebene darstellen, ähnelt der Verlauf der Messwerte denen aus Abbildung 24, S.77. Die minimale Breite beträgt 0,55 mm. Zylinder mit Soll Durchmesser $\geq 0,7$ mm weisen eine zu geringe Breite auf. Die mittleren Abweichungen liegen bei -0,24 mm.

4.4.3.2 Q20plus

Der Verlauf der Messwerte ist ähnlich zu denen der A2X, wenngleich die Abweichungen unterschiedlich sind. Die Ergebnisse der Messung in Baurichtung, welche die Höhe der Zylinder widerspiegeln, zeigen größere Maße als dimensioniert. Die Abweichungen betragen durchschnittlich 0,32 mm und im Maximum 0,4 mm.

Für die Breitenmessung beträgt das Minimum 0,54 mm. Ab Solldurchmessern von $\leq 0,6$ mm werden die Strukturen nicht schmaler. Zylinder mit einem Durchmesser $\geq 0,7$ mm besitzen mittlere Abweichungen von 0,02 mm.

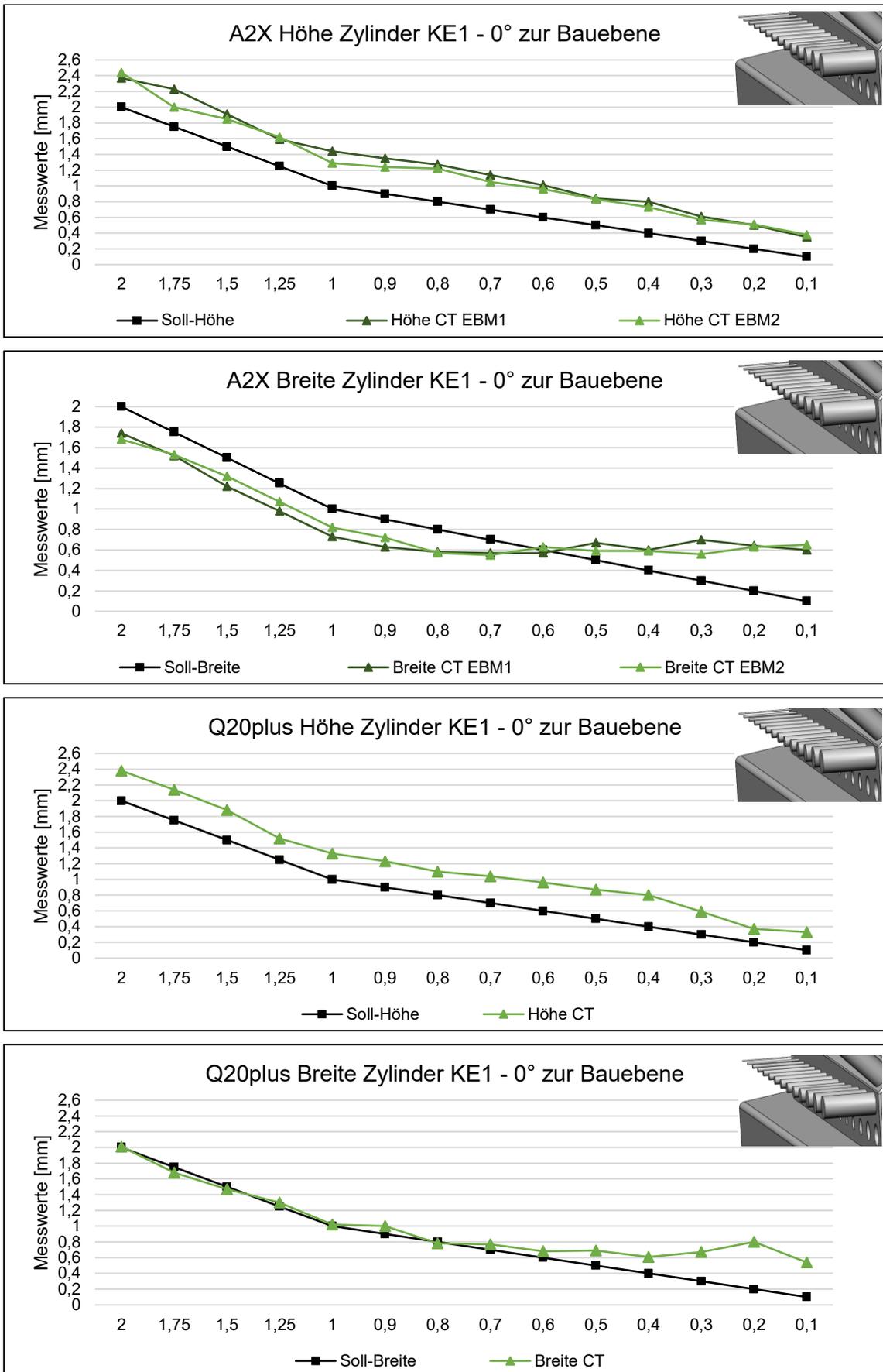


Abbildung 28 Höhen- und Breitenabweichungen der Zylinder KE1 achsparallel zur Bauebene

4.4.4 Minimaler Bohrungsdurchmesser mit Achswinkel 90° zur Bauebene

Bei der Auswertung der Bohrungen allgemein wird zwischen dem Entstehen der Bohrung und der Entfernbareit des Überschusspulvers unterschieden. Speziell an den Bohrungen 90° zur Bauebene sind konstruktive Herausforderungen des Demonstrators aufgetreten. Die Öffnungen der Bohrungen erscheinen an der Unterseite verjüngt. Der Schnitt durch das CAD-Modell in Abbildung 29a zeigt die Ursache dafür. Im unteren Bereich der Bohrungen werden die umliegenden Strukturen breiter gefertigt als dimensioniert. Grund hierfür ist die bereits festgestellte minimale Strukturdicke. Daraus folgen die Formabweichungen der CT-Darstellungen in Abbildung 29b für die A2X und in Abbildung 29c für die Q20plus. Der flächige Abschluss der Bohrung in Abbildung 29c ist Resultat der Fertigung direkt auf der Bauplatte, wohingegen der Demonstrator in Abbildung 29b auf Support gefertigt wurde. Die gelbe Umrandung entspricht der modellierten Kontur. Bei der Auswertung der Messungen sind die verformten Unterseiten ausgeschlossen worden. Ferner ist in den jeweiligen CT-Darstellungen zu sehen, dass Bereiche mit anderen Grauwerten im Vergleich zur dichten Struktur existieren. Ursache dafür ist Überschusspulver, welches sich in den Bohrungen befindet und durch die gezielte Pulverentfernung heraus fällt.

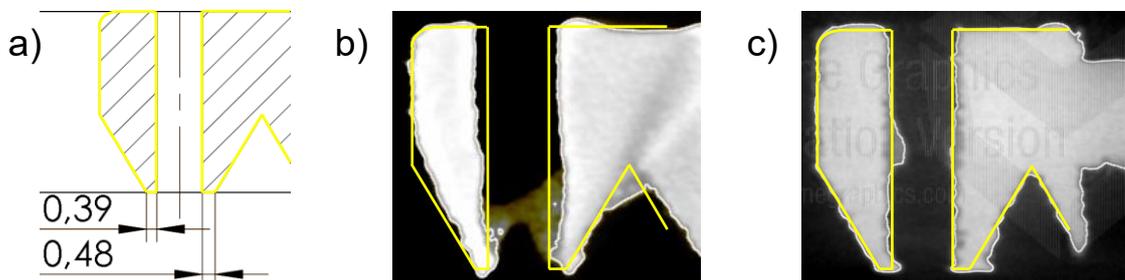


Abbildung 29 Formabweichung im Bezug zum a) CAD der Bohrungsunterseiten des RTC-Probekörpers hergestellt mit der b) A2X und c) Q20plus

Da das Restpulver folglich nicht innerhalb des Pulveraufbereitungssystem entfernt wurde, wird nachträglich mit Draht versucht, dieses zu entfernen. Kann der Draht durch die Bohrung hindurch geschoben werden, lässt sich die entsprechende Öffnung von Pulver befreien.

Zur Erzeugung der anlagenspezifischen Ergebnisse in Abbildung 30 sind an den Bohrungen mehrere Kreisquerschnitte extrahiert und Abweichung des Zylinderdurchmessers erfasst worden.

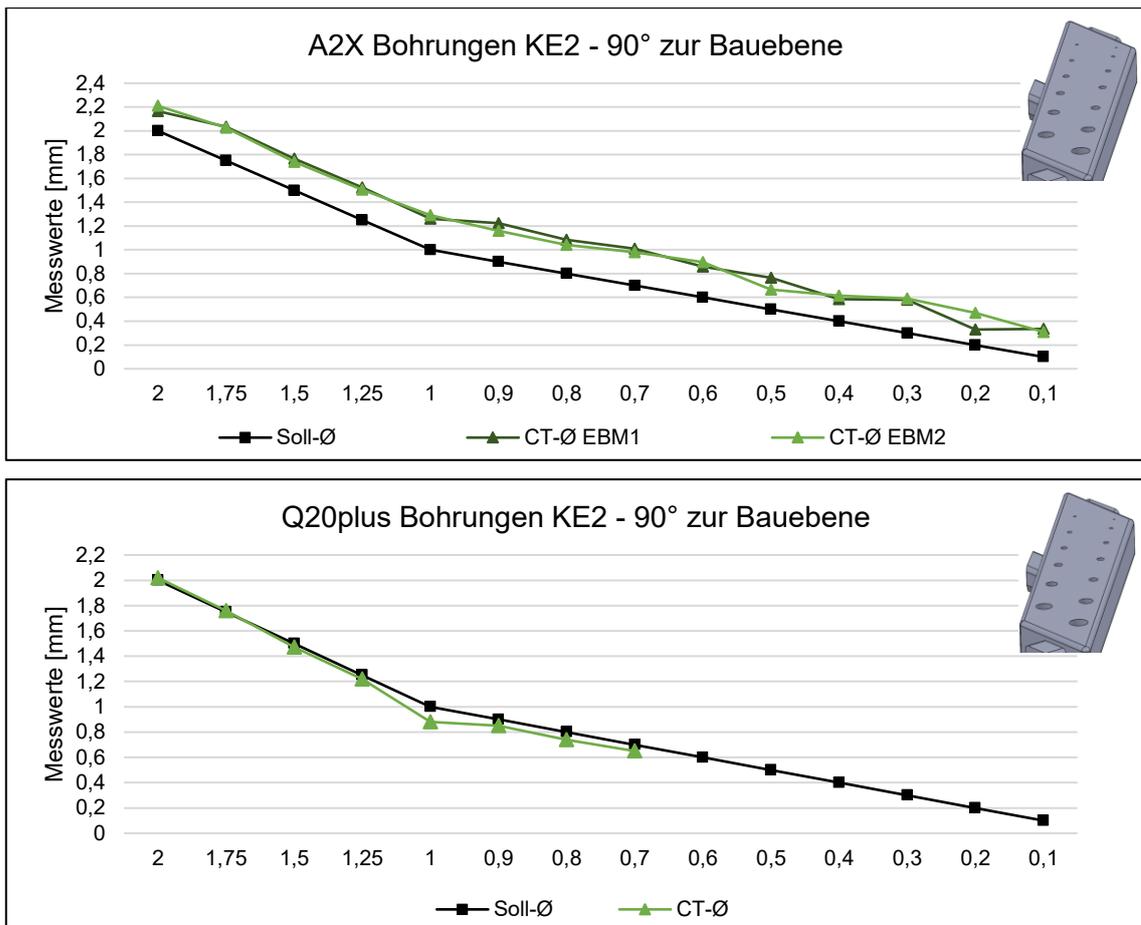


Abbildung 30 Abweichungen der Bohrungen KE2 achsparallel zur Z-Richtung

4.4.4.1 A2X

Durch die Verengungen an der Unterseite der Bohrungen erscheinen diese ab einem Solldurchmesser $d \leq 0,3$ mm verschlossen. Bei $d \geq 0,6$ mm ließen sich die Bohrungen bei beiden Demonstratoren von Pulver befreien. Die Messungen zeigen mittlere Abweichungen von 0,25 mm zum Solldurchmesser.

4.4.4.2 Q20plus

Bis zu einem Solldurchmesser $d \geq 0,7$ mm konnten Messwerte extrahiert werden. Unterhalb dieses Wertes waren keine deutlich messbaren Lochflanken analysierbar. Die mittlere Abweichung der Messungen beträgt -0,04 mm. Das Pulver konnte bis zu einem Solldurchmesser von $d \geq 0,9$ mm entfernt werden.

4.4.5 Minimaler Bohrungsdurchmesser mit Achswinkel 0° zur Bauebene

Die Bohrungen weichen von deren zylindrischer Form ab. Folglich wird bei deren Auswertung in Höhe und Breite identisch zu den Zylindern in Abschnitt 4.4.3 unterschieden. Die Formabweichungen für die A2X und die Q20plus verglichen mit dem

CAD-Schnitt sind in Abbildung 31a-c dargestellt. Die gelbe Umrandung entspricht der modellierten Kontur. An den Öffnungen zeigen sich Konturfehler, welche dazu führen, dass die Bohrungen an beiden Seiten schmaler werden. Dies ist an den Demonstratoren der A2X und der Q20plus erkennbar.

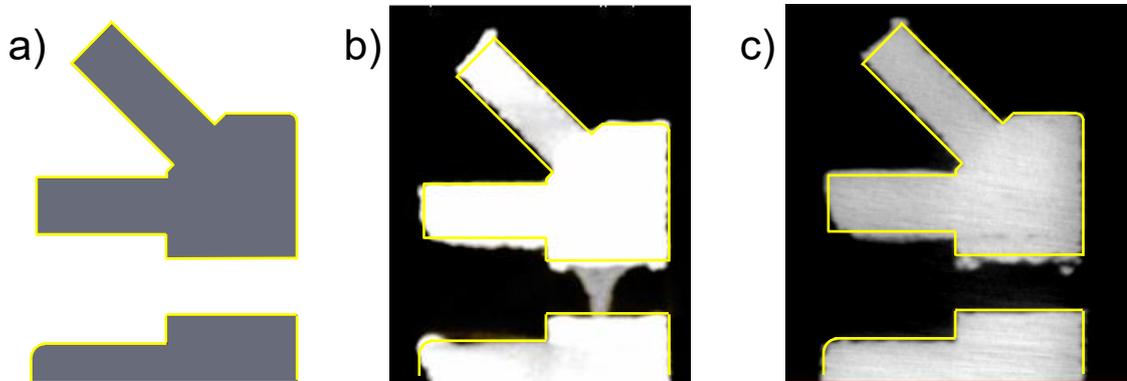


Abbildung 31 Formabweichungen verglichen mit a) dem CAD und den CT-Schnitten der Anlagen b) A2X und c) Q20plus

Die Ergebnisse der jeweiligen Messung sind in Abbildung 32 dargestellt und im Folgenden anlagenbezogen ausgewertet. Höhe und Breite bei der Q20plus werden aufgrund der geringen Datenlage in einem Diagramm dargestellt. Bei signifikanten Formabweichungen sind jeweils die Werte erfasst worden, welche die geringsten Maße erzeugen.

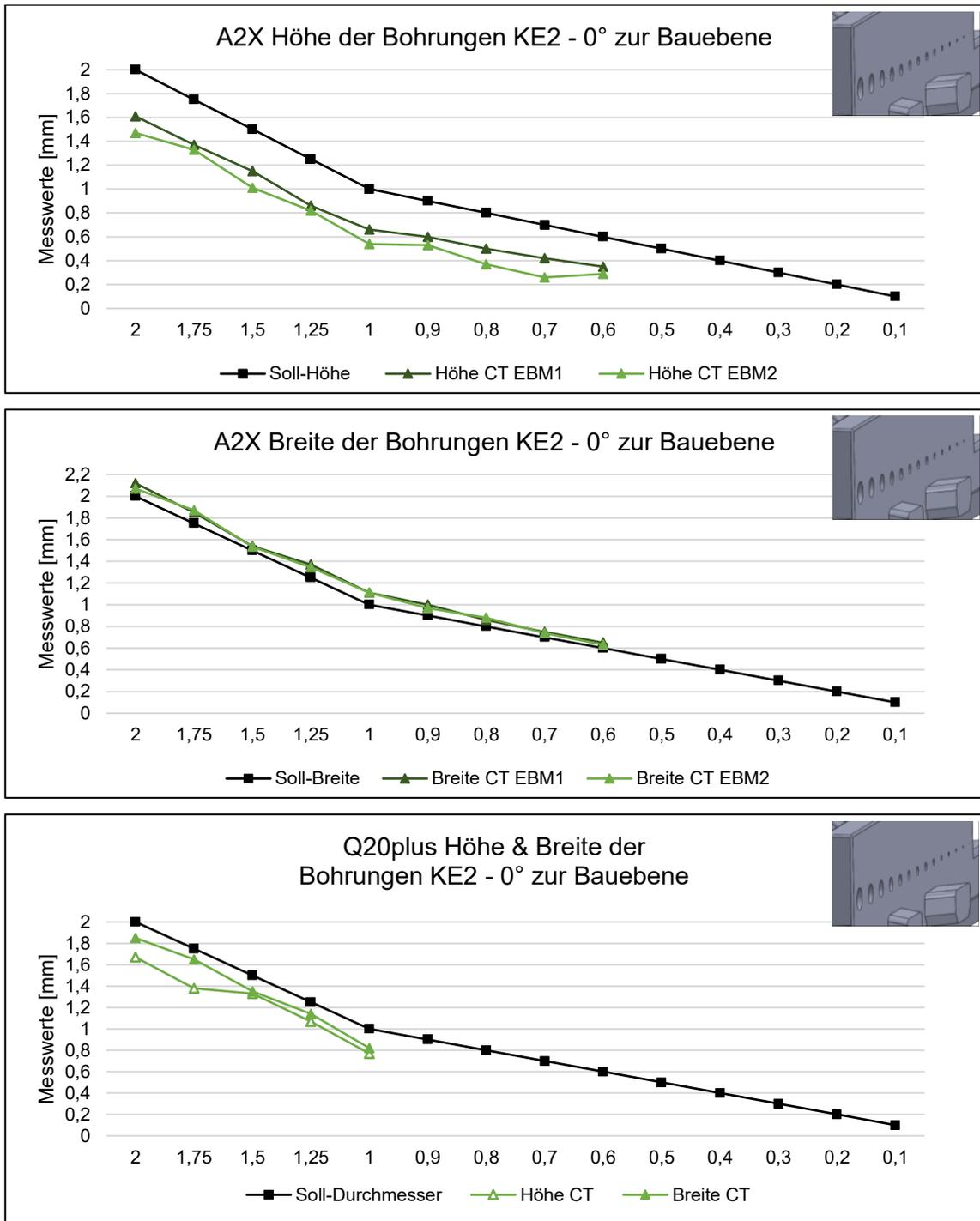


Abbildung 32 Abweichungen in Höhe und Breite der Bohrungen KE2 achsparallel zur Bauebene

4.4.5.1 A2X

Bei den Messungen in Baurichtung entlang der Bohrungshöhe sind Abweichungen der beiden Demonstratoren im Mittel von -0,38 mm und maximal von -0,53 mm erfasst worden. Bohrungen < 0,6 mm waren vollständig verschlossen. An beiden Demonstratoren ließ sich bei Solldurchmessern $\geq 0,8$ mm das Pulver entfernen. Die Abweichungen aller erfassbaren Bohrungen in der Breite betragen im Mittel 0,08 mm und maximal 0,12 mm.

4.4.5.2 Q20plus

Alle Bohrungen mit einem Solldurchmesser < 1 mm waren punktuell verschlossen und deren Ergebnisse nicht messbar. Die erfassbaren Bohrungen konnten von Pulver befreit werden. Beide Messgrößen zeigen negative Abweichungen. Bezogen auf die Höhe betragen diese im Mittel $-0,26$ mm und maximal $-0,37$ mm. Die Breite weicht durchschnittlich um $-0,14$ mm und maximal um $-0,18$ mm ab.

4.4.6 Minimale Wandstärke in Baurichtung

Zur Erfassung der minimalen Wandstärke t wurden die Geometrien des KE3 ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 dargestellt. Die Messwertbeschreibung beinhaltet die Messrichtung der Wände bezogen auf das Maschinenkoordinatensystem. Folglich bezeichnet die X-Richtung die Wanddickenvariationen, welche entlang der X-Achse gemessen wurde.

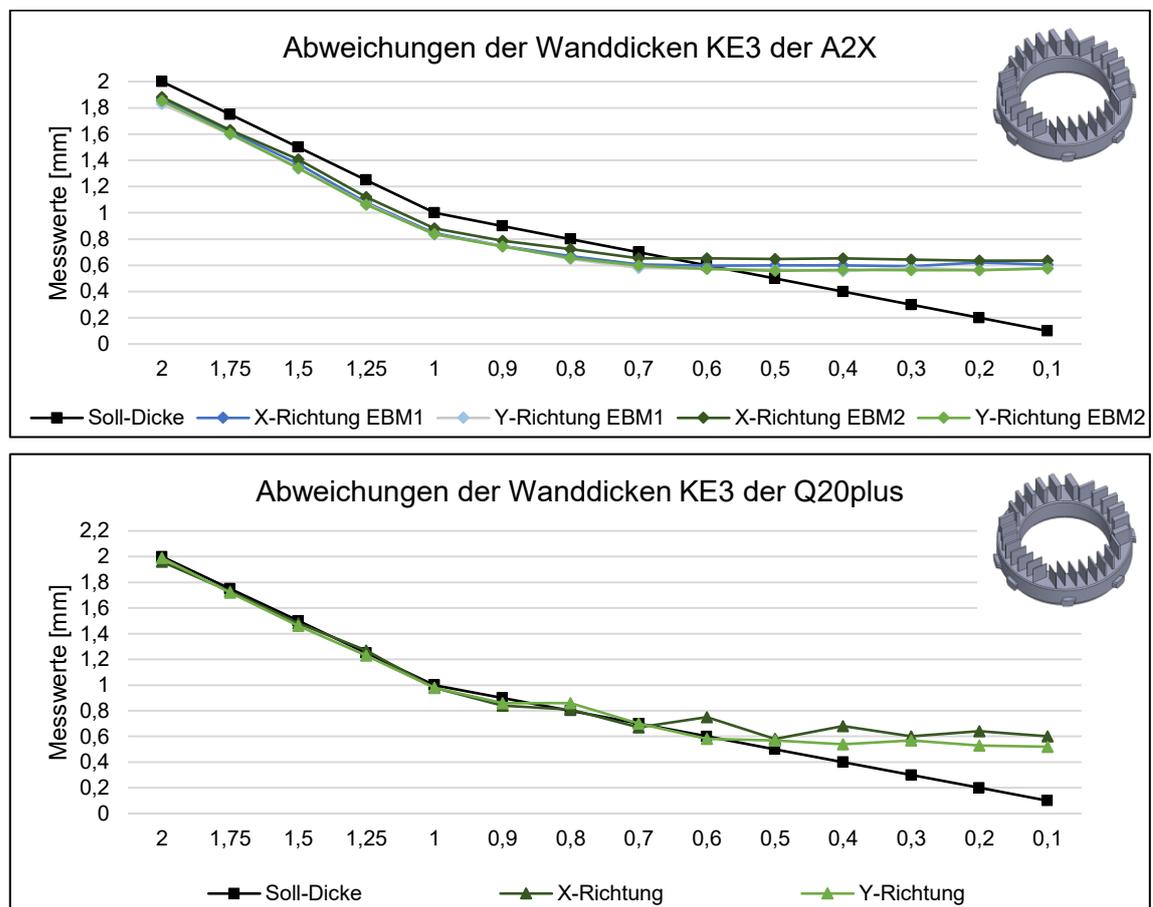


Abbildung 33 Abweichungen der Wanddicken KE3 beider Anlagen

4.4.6.1 A2X

Die Messwerte bei Wanddicken $t \geq 0,7$ mm sind kleiner als dimensioniert. Im Mittel betragen diese Abweichungen $-0,14$ mm. Die kleinste gemessene Wandstärke beträgt $0,55$ mm. Im Ergebnis zeigen sich geringe Unterschiede in Abhängigkeit der Ausrichtung. Beide Demonstratoren zeigen stärkere Wanddicken entlang der X-Richtung, wenngleich die Unterschiede maximal $0,05$ mm betragen.

4.4.6.2 Q20plus

Die minimal gemessene Wandstärke t beträgt $0,52$ mm. Die Messwerte an Solldicken $t \geq 0,7$ mm weisen eine mittlere Abweichung von $-0,02$ mm auf. Identisch zur A2X sind die Messwerte entlang der X-Achse geringfügig größer verglichen mit der Y-Richtung. Die Unterschiede betragen $0,01$ mm.

4.4.7 Minimaler Spaltabstand in Baurichtung

Die Spaltmaße g_{XY} sind erfasst worden, solange die Spalten vollständig offen erscheinen, selbst wenn Pulver darin verbleibt. Aufgrund vernachlässigbar geringer Maßabweichungen in X- und Y-Richtung ist hierbei keine Unterleitung durchgeführt worden und es gilt $g_{XY} = g_X = g_Y$. Sobald ein Verschluss zu erkennen war, wurden keine Messwerte extrahiert. Ähnlich zu den Bohrungen in Abschnitt 4.4.4 besitzen die Stege an der Unterseite eine Einkerbung, wodurch spitze Kanten an den Spalten resultieren. Bei der Messung der Spaltbreite werden diese Verformungen ausgeschlossen. Da die Spalten verbleibende Pulverreste beinhalten, wird ähnlich wie bei den Bohrungen mithilfe eines Drahtes deren Durchgängigkeit und Überschusspulverentfernung geprüft. Die Ergebnisse der Messungen der fertigen Spalten sind in Abbildung 34 für jede Anlage separat dargestellt.

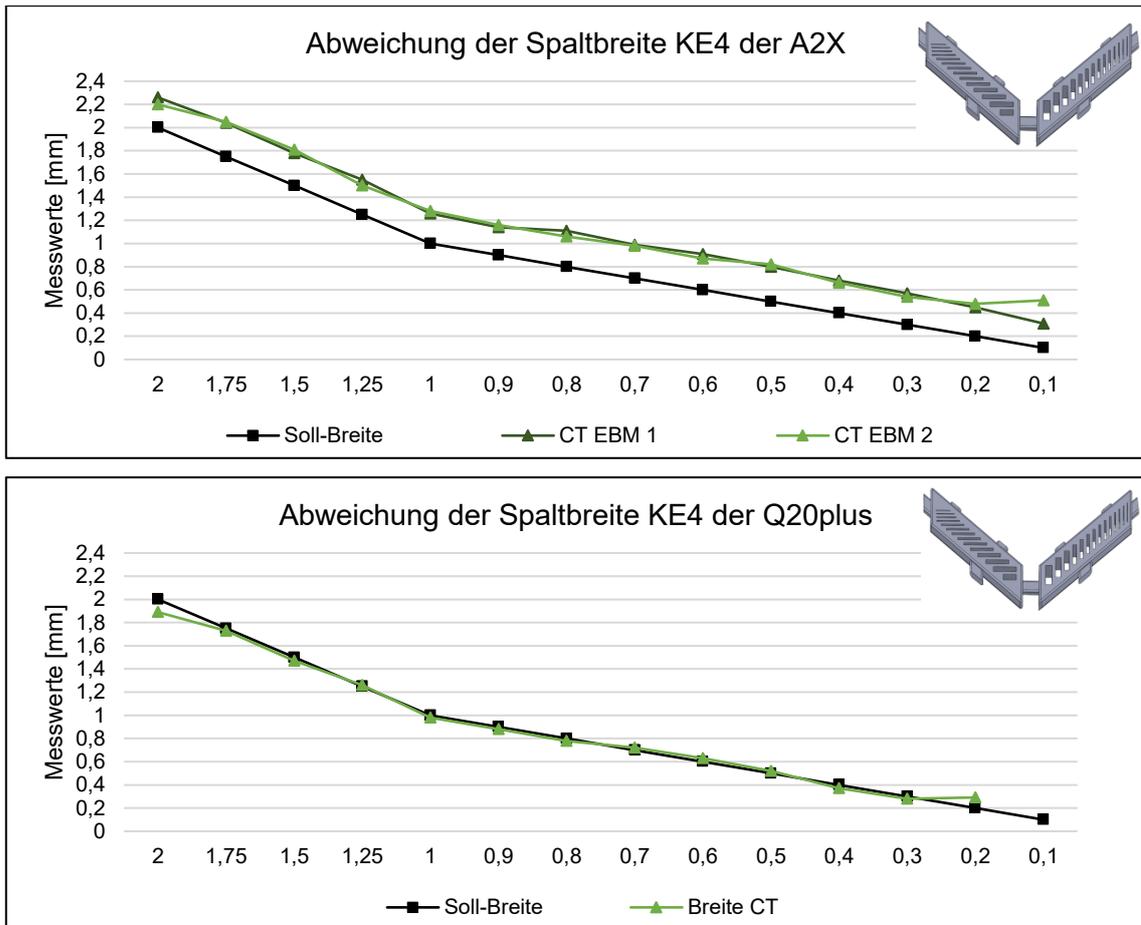


Abbildung 34 Abweichungen der Spaltbreite KE4 beider Anlagen

4.4.7.1 A2X

Alle Spalte werden zu breit gefertigt. Die Abweichungen für g_{XY} betragen 0,28 mm. Die nahezu vollständige Pulverentfernung ist ab einer Spaltbreite $g_{XY} \geq 0,4$ mm möglich.

4.4.7.2 Q20plus

Bis auf das Soll-Spaltmaß g_{XY} von 0,1 mm sind alle Spalten messbar. Die Abweichungen betragen im Mittel -0,02 mm. Die nahezu vollständige Pulverentfernung ist ab einer Sollbreite von $\geq 0,7$ mm möglich.

4.4.8 Winkeltreue an Downskin-Flächen

Die Winkel der Downskin-Fläche δ an ebenen Flächen wird dem KE5 für beide Anlagen entnommen. Hierzu ist jeweils die Downskin-Fläche ausgewertet worden, da mögliche Formabweichungen vorrangig an den nach unten weisenden Flächen zu erwarten sind. Die Darstellung der Messergebnisse erfolgt in Abbildung 35. Die maximalen Winkelabweichungen betragen gemittelt über die gesamte Länge der Strukturen für die A2X 2° und die Q20plus $2,2^\circ$.

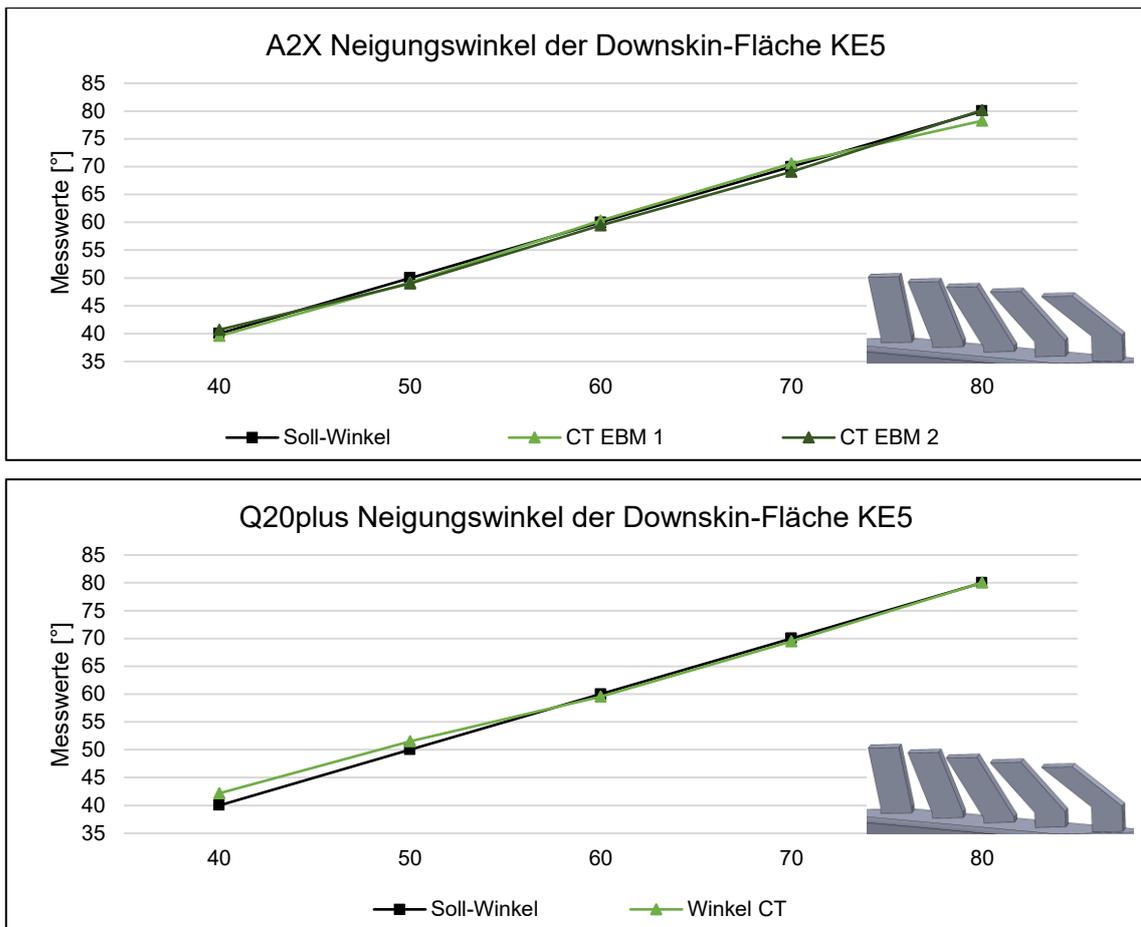


Abbildung 35 Winkelabweichungen der Downskin-Flächen KE5 abhängig vom Winkel

4.4.9 Minimale Wandstärke überhängender Strukturen

Alle ebenen Überhangstrukturen beider Anlagen sind ohne signifikante Verformung gefertigt worden. Allerdings zeigen die jeweiligen Ober- und Unterseiten der Strukturen Konturfehler ähnlich zum Bauraumdemonstrator (vgl. Abbildung 19, S. 71). Durch die kleinen Flächen werden diese im Gegensatz zu den Strukturen in Abschnitt 4.3.2 mit aufgenommen. Die Strukturen der Demonstratoren der A2X wurden hierbei ausschließlich mittels optischer Messung erfasst. Für die Q20plus sind die Abweichungen der digitalen Messverfahren signifikant, so dass diese Messungen zusätzlich taktil mittels Messschieber durchgeführt werden. Dies soll der Einordnung der Messabweichungen bei unterschiedlichen Messstrategien dienen. Die Darstellung der Ergebnisse der entsprechenden Höhenabweichungen erfolgt in Abbildung 36 anlagenspezifisch.

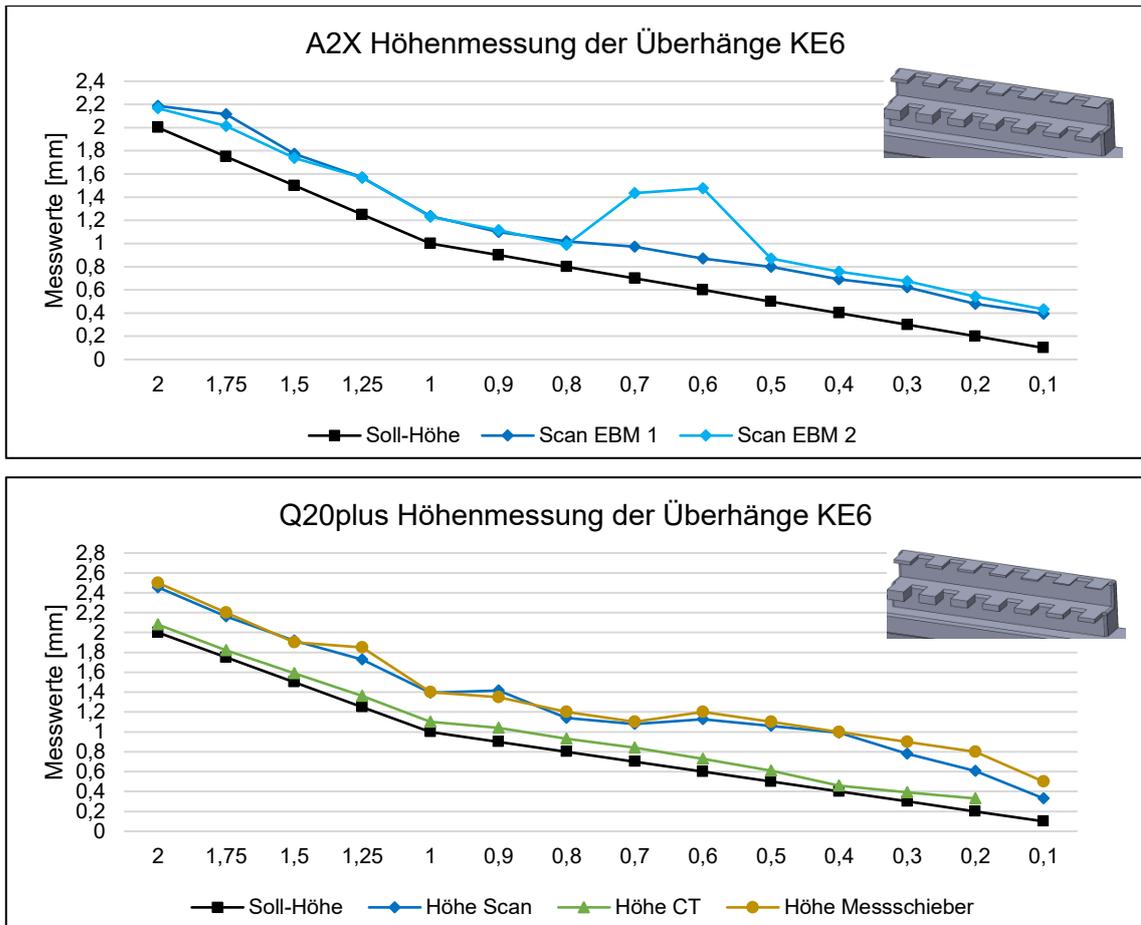


Abbildung 36 Höhenabweichungen der Überhänge KE6 der Demonstratoren

4.4.9.1 A2X

Alle Überhänge sind höher als dimensioniert. Die signifikanten Abweichungen der Sollmaße 0,7 mm und 0,6 mm an einem der Demonstratoren ist auf Digitalisierungsfehler zurückzuführen. Ausgenommen dieser Werte betragen die mittleren Abweichungen der Wandstärken t beider Demonstratoren im Mittel 0,28 mm und maximal 0,38 mm.

4.4.9.2 Q20plus

Die Messungen der optischen und taktilen Messmethode liegen in ähnlichen Bereichen. Deren Abweichungen zum Sollmaß betragen im Mittel 0,44 mm und maximal 0,5 mm. Die volumetomografische Messung zeigt hingegen durchschnittlich 0,09 mm. Der letzte Messwert ist mittels CT nicht erfassbar, da der Dichtewert der Struktur ungenügend erscheint. Die Differenzen der Ergebnisse lassen sich auf die Messprinzipien zurückführen. Mittels volumetomografischer Messung sind Unterschiede zwischen überhöhter Randkontur an der Unterseite der Strukturen und flächigem Bereich, welcher als Referenz bei dieser Messmethode herangezogen wurde, erkennbar. Im Zuge der digitalen Aufbereitung der optischen Messergebnisse erscheint die Unterseite

annähernd eben. Mittels taktiler Messung ist davon auszugehen, dass jeweils die höchste Erhöhung jeder Seite der Struktur erfasst wurde.

4.4.10 Zwischenfazit und -diskussion

In diesem Abschnitt sind orientierungsabhängige, minimale, herstellbare Strukturen untersucht worden. Neben den entsprechenden Ergebnissen lassen sich Auffälligkeiten finden, deren Ursachen und Auswirkungen folglich diskutiert werden.

Die Messwerte der A2X zeigen bei allen Messungen höhere Abweichungen verglichen zur Q20plus. Unabhängig der Features sind die Abweichungen so gerichtet, dass sich Oberflächen jeweils zurückgesetzter abzeichnen als dimensioniert. Es scheint folglich eine Art systematischer Fehler zu existieren, welcher sich durch Anlagenparameteränderung kompensieren lässt.

Die Messmethoden zeigen teils signifikante Unterschiede in den Ergebnissen. Mittels optischer Messverfahren werden all jene Oberflächen aufgenommen, welche für beide Kameras sichtbar, ausgeleuchtet und registrierbar erscheinen. Folglich ist davon auszugehen, dass die Oberflächen im Bereich der Rauheitsspitzen detektiert worden sind. Mitunter werden nicht entfernte Pulverreste als Oberfläche erkannt.

Mittels volumetomografischer Messung lassen sich messbare Flächen detektieren, sobald deren Dichtewert oberhalb des individuellen Schwellwertes liegt. Dies ist im Bereich der Rauheitstäler denkbar und führt folglich zu Unterschieden in den Ergebnissen beider Messverfahren.

Strukturen, welche parallel zu Bauplattform hergestellt wurden, besitzen Formabweichungen. Bei Zylindern äußern sich diese je nach Durchmesser vorrangig an den Unterseiten, wodurch eine Art umgekehrte Tropfenform entsteht (vgl. Abschnitt 4.4.3). In der Literatur ist dies ebenfalls thematisiert (Rafi et al. 2012b). Die Nutzung von Stützstrukturen scheint dies nicht zu verhindern (Rafi et al. 2012b). Als Grund wird die Wärmeabfuhr in den unteren Schichten genannt, wodurch zusätzliches Pulver ansintert. Dies ist ebenfalls bei Bohrungen an der überhängenden Oberseite aufgetreten. Zudem erscheinen die Bohrungen an den Randbereichen zusätzliche verengt (vgl. Abbildung 29, S. 82). Ähnliche Formabweichungen zeigen sich an den Randbereichen der Unterseiten ungekrümmter Überhänge.

4.5 Pulverentfernung

Zur Pulverentfernung ist der nachfolgende Demonstrator mittels A2X gefertigt worden. Dieser besitzt einseitig offene, zylindrische Öffnungen mit Durchmessern von 5 mm; 7,5 mm und 10 mm. Zudem enthält der Körper eine Krümmung mit Variation des Krümmungsradius und -winkels. Der Demonstrator ist in Abbildung 37 mit der entsprechenden Orientierung im Bauraum dargestellt. Zu dessen detaillierter Beschreibung sei auf Abbildung 98 und Tabelle 28, S. 230 in Anlage A-16 verwiesen.

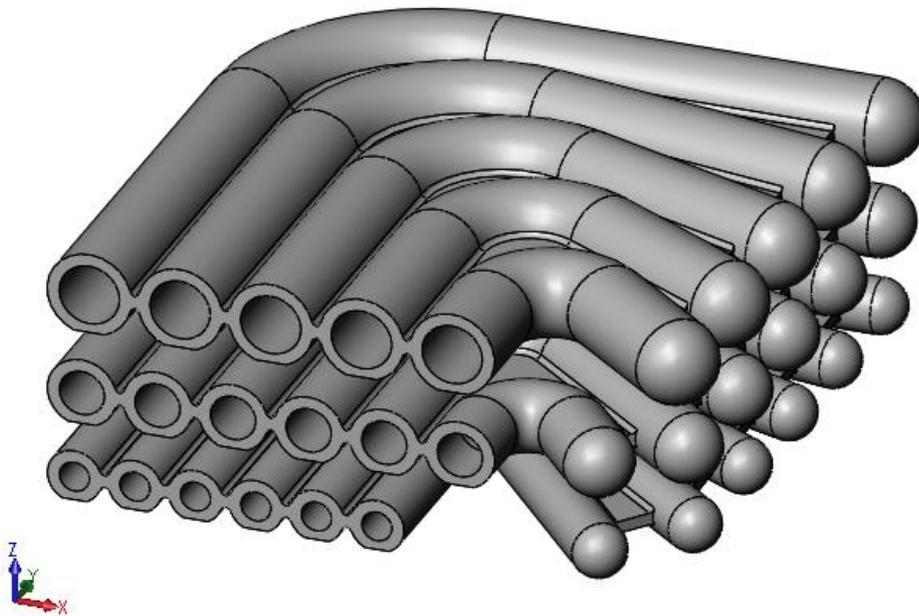


Abbildung 37 Demonstrator zur Untersuchung der Pulverentfernbarkeit

Anhand dieses Demonstrators sind folgende Möglichkeiten der Pulverentfernung untersucht worden, um die Sinterverbindungen zu lösen und das Überschusspulver zu entfernen.

- Mechanische Pulverentfernung mithilfe eines rotierenden Drahtes
- Gezielter Druckluft-, Pulver- und Wassereinschuss in die Kanäle
- Infiltration mit Wasser und Einlegen in ein Ultraschallbad
- Infiltration mit Wasser und Erstarren zu Eis, um durch das Ausdehnen des Wassers die Verbindungen zu lösen.
- Chemisches Ätzen mittels Säure

Neben der Sichtprüfung erfolgt die Bewertung der Räumwirkung auf Basis des Bauteilgewichts. Das gesinterte Pulver besitzt eine zuvor bestimmte Dichte, wodurch das Volumen des geräumten Bereichs errechnet und mit dem theoretischen Volumen aus den Angaben aus Tabelle 28, S. 230 in Anlage A-16 verglichen wird.

4.5.1 Versuchsauswertung zur Pulverentfernung

Alle Rohre des Demonstrators sind ohne Stützstruktur im Inneren vollständig entstanden. In Tabelle 6 werden die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 6 Ergebnisse der Pulverentfernungsversuche

Methoden	Ergebnis	Anmerkung
Ausbürsten mittels Draht		Die grün dargestellten Kanäle sind mit Umknicken der Drahtspitze vollständig geräumt worden. Bei den gelb dargestellten Kanälen konnten die Bereiche nach der Krümmung nicht vollständig geräumt werden. Kanäle, die bis zur Krümmung geräumt wurden, sind rot gekennzeichnet. Mit Umknicken der Drahtspitze ist bis zu 81 % Pulver entfernt worden.
Druckluft-, Wasser- oder Pulver- strahlen		Die gelb dargestellten Kanäle sind bis zur Krümmung vollständig geräumt worden. Bei rot gekennzeichneten Kanälen ist keine Räumwirkung aufgetreten. Bis zu 45 % des Gesamtvolumens wurden von Pulver befreit. Die Strahldüse muss hierbei direkt an der Wirkstelle arbeiten.
Ultraschall		Es ist keine Räumwirkung erreicht worden. Die Leistung ist nicht ausreichend zum Aufbrechen der Sinterhalse. Die dichte Packung des Pulvers verhindert zudem das Lockern.
Gefrieren von Wasser		Es ist keine Räumwirkung erreicht worden. Die Sinterhalse konnten nicht aufgebrochen werden.
Ätzversuche		Eine Ätzwirkung ist ausschließlich durch Flusssäure erreicht worden. Die Ätzraten betragen 60-80 $\mu\text{m}/\text{min}$. Die Anwendung erfordert aufgrund der Säure hohe Sicherheitsanforderungen und eine lange Wirkdauer.

Die Ergebnisse zeigen, dass zur Entfernung des Überschusspulvers eine hohe Energieeinwirkung benötigt wird. Methoden, welche zu geringe oder keine Krafteinwirkung auf das Pulver haben, erweisen sich nicht als zielführend. Je nach Strukturkomplexität ist das vollständige Entfernen des Pulvers aus Kanaldurchmesser > 5 mm möglich. Herausfordernd sind hierbei jene Strukturbereiche, welche nicht unmittelbar erreicht werden. Es ist gezeigt worden, dass sich Kanalverläufe nach Krümmungen von bis zu 130° Neigung bei einem Krümmungsradius ≥ 10 mm und Kanaldurchmesser > 7 mm mittels eines rotierenden Drahtes bis auf vereinzelte Rückstände räumen lassen.

Als Fazit der Versuche zur Pulverentfernung ist festzuhalten, dass entsprechende Hohl- oder Kanalstrukturen so zu gestalten sind, dass die Entfernung von Überschusspulver durchführbar und eine Überprüfung ermöglicht wird. Je nach Strukturdicke lassen sich die Kontrollen mittels CT-Analysen durchführen. Bei ausreichend großen Kanalstrukturen können Endoskope zum Einsatz kommen. Toträume, welche keine visuellen Kontrollmöglichkeit während oder nach der Pulverentfernung erlauben, sollten vermieden werden.

Bezüglich der Methoden zur Entfernung des Überschusspulvers ist nach der Reinigung im Pulveraufbereitungssystem die Nutzung eines rotierenden Werkzeuges wie beispielsweise eines Drahtes zielführend. Dadurch werden Öffnungen im versinterten Pulver generiert. Je nach Strukturverlauf ist dieses Werkzeug zu modifizieren oder zu wechseln, um möglichst tiefe und größere Bereiche zu erreichen. Das Pulver, welches dadurch gelockert wurde, sollte stetig entfernt werden und lässt sich rezyklieren. Um eine vollständige Pulverentfernung zu erzielen, lässt sich das verbleibende Pulver abschließend durch Ätzen entfernen. Da für die hierbei genutzte Titanlegierung ausschließlich Flußsäure effizient ist, müssen bei der Anwendung entsprechend hohe Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden.

4.5.2 Maßhaltigkeit der Rohröffnungen des Demonstrators

Neben der Entfernung des Überschusspulvers sind die Rohröffnungen auf deren Maßhaltigkeit untersucht worden. Hierzu wurden die jeweiligen Eingänge optisch vermessen. Es zeigen sich Formabweichungen an den Außenseiten der Rohre. Hierzu sind beispielhaft die Eingänge des Demonstrators an Abbildung 38a und eine entsprechende Schnittdarstellung der Analyse bei 0,5 mm hinter der Rohröffnung in Abbildung 38b dargestellt. An den Rohren, bei welchen die Stützstrukturen nahe an der Öffnung erstellt wurden, bilden sich geringe Formabweichungen. Diese Art der

Formabweichung tritt zudem entlang der Rohrstruktur bei ungenügender Stützstruktur auf, wie in Abbildung 38a an den Rohrenden rechts zu sehen ist.

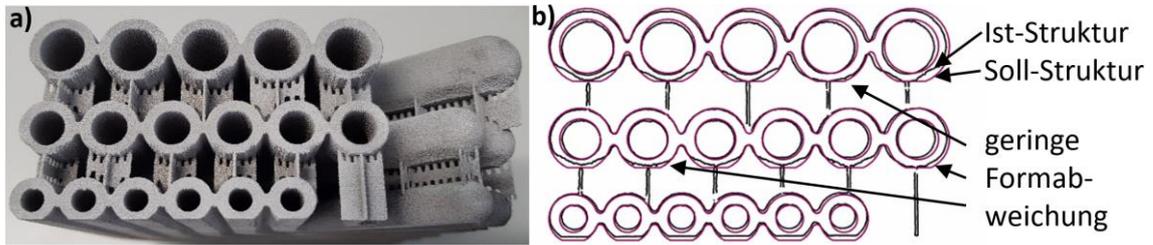


Abbildung 38 Darstellung der a) Öffnungen des Pulverentfernungsdemonstrators und b) Schnitt parallel zur Rohrflanschenebene

Zur Darstellung der Messungen sind die Höhen der Rohröffnungen bis zu einer Tiefe von 4 mm gemessen worden. In Abbildung 39 erfolgt die Darstellung der Abweichungen über die Tiefe der Rohröffnungen für die Mittelwerte aller Rohre eines Durchmessers. Die entsprechenden Sollmaße werden jeweils mit schwarzen Linien abgebildet.

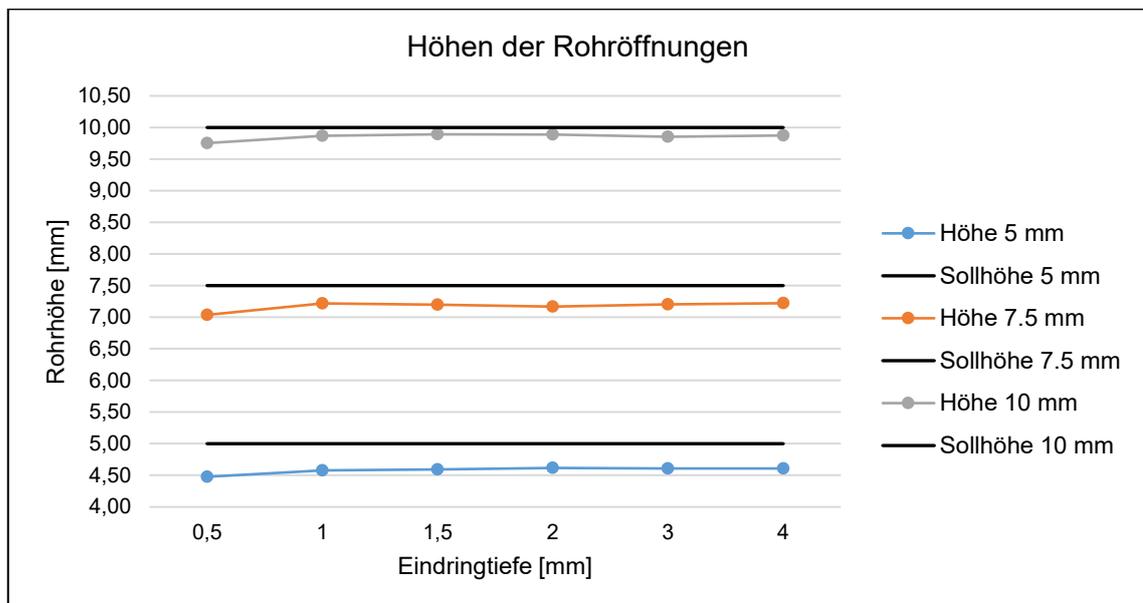


Abbildung 39 Abweichungen der Rohrhöhe in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und der Rohrtiefe

Die Ergebnisse zeigen durchmesserabhängige, negative Höhenabweichungen. Im Mittel betragen diese bei Sollhöhen von 5 mm; 7,5 mm und 10 mm jeweils -0,42 mm; -0,33 mm und -0,15 mm. An den Rohröffnungen sind stärkere Abweichungen erkennbar. Sowohl die Werte der kleineren Öffnungen als auch die erhöhte Einschnürung am Beginn des Rohres korrelieren mit den Ergebnissen aus den Abschnitten 4.4.3, 4.4.5 und 4.4.9. Ferner ist festzustellen, dass kreisrunde Öffnungen mit deren Achse parallel zur Bauebene und einem Durchmesser bis zu 10 mm ohne Stützstruktur bei vergleichsweise geringen Formabweichungen hergestellt werden können. Dass diese kleiner sind im

Vergleich zu den Solldurchmessern 5 mm und 7,5 mm, deutet auf beginnende überlagernde Verformungseffekte aufgrund des steigenden Überhangbereichs hin.

4.6 Überhanguntersuchungen

Zur Charakterisierung von Überhängen werden zwischen dem kritischen Überhangwinkel, ab welchem Strukturabweichungen auftreten, sowie der ungestützten, freien Länge unterschieden. Diese Erscheinungen werden an unterschiedlichen Demonstratoren untersucht. Speziell beim EBM zeigt sich zudem, dass bei Downskin-Winkeln von 0° eine Herstellung ohne Stützstruktur und ohne relevante Formfehler speziell bei filigranen Strukturen möglich ist (vgl. Abschnitt 2.2.2.1.3).

4.6.1 Kritischer Überhangwinkel

Zur Untersuchung wurde ein Demonstrator entwickelt, bei welchem der Downskin-Winkel δ von 24° auf 45° um jeweils ein Grad erhöht worden ist. Dies ermöglicht die Aussage, ab welchem Winkel eine Verformung eintritt. In Abbildung 40 erfolgt die Darstellung des Demonstrators.

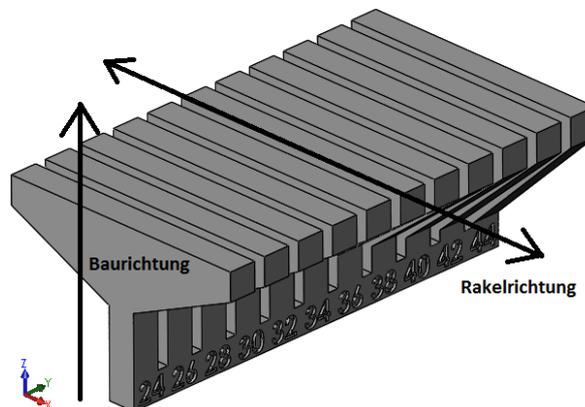


Abbildung 40 Demonstrator zur Untersuchung des kritischen Überhangwinkels

Der Demonstrator ist vollständig aufgebaut worden, zeigt allerdings starke Verformungen der Strukturen bei kleinen Winkeln. Die Downskin-Flächen zeigen konkave Wölbungen und bilden keine Ebene. Bei der Analyse der Winkel wird aufgrund dessen in gemittelte, maximale und minimale Abweichungen unterschieden, welche schematisch in Abbildung 41 abgebildet sind. Die Darstellung der entsprechenden Abweichungen erfolgt in Abbildung 42. Ab einem Sollwinkel $> 35^\circ$ betragen die Abweichung aller Messungen weniger als ein Grad. Zudem ist die Wölbung derart gering, dass kaum Unterschiede zwischen maximalen und gemittelten Winkelabweichungen resultieren.

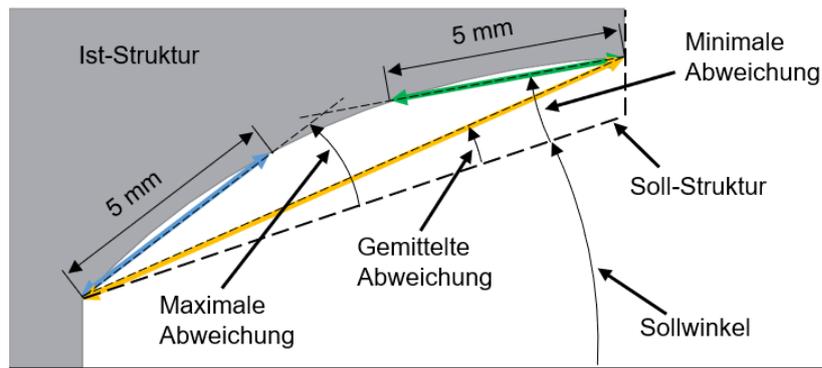


Abbildung 41 Schematische Darstellung der Winkelabweichung zur Überhangcharakterisierung

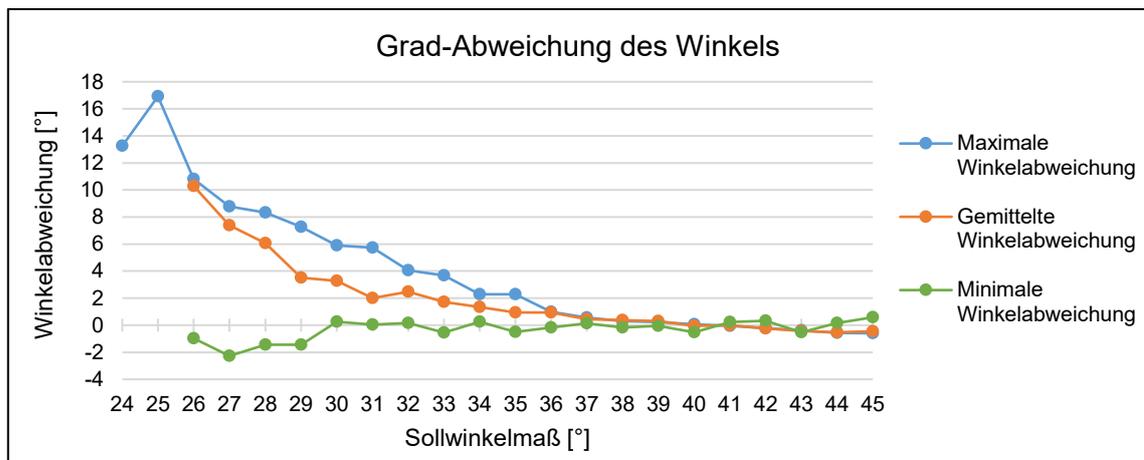


Abbildung 42 Winkelabweichung der Downskin-Flächen in Abhängigkeit des Messprinzips

Durch den un stetigen Verlauf der Schrägen bei Sollwinkeln von 24° und 25° ist keine Messung der mittleren und minimalen Winkelabweichungen möglich. Die Verformungen der Strukturen bei Winkeln < 30° führen neben der Wölbung an der Downskin-Fläche zu Formabweichungen an der Oberseite des Demonstrators.

4.6.2 Kritische freitragende Überhanglänge

Zur Untersuchung der freitragenden Länge l_{krit} von kritischen Überhängen ist eine T-Struktur verwendet worden, welche ab einer Höhe von 5 mm beidseitig freie, ungestützte Schenkel mit Längen von 20 mm besitzt. Deren Schenkelhöhe wurde von 0,5 mm bis 10 mm in 0,5 mm Schritten erhöht, um den Einfluss der Energieeintragung zu untersuchen. Im Gegensatz zum Demonstrator zur Untersuchung des kritischen Überhangwinkels sind die T-Strukturen jeweils einzeln mit einem Abstand von 5 mm zueinander in die Baukammer platziert worden. Um den eingangs beschriebenen Einfluss einer bauebenenparallelen Downskin-Fläche zu untersuchen, wurden die T-Träger jeweils mit einem Winkel von 0° und 5° zur Bauebene konstruiert. Abbildung 43 zeigt beide Varianten und die entsprechende Orientierung im Bauraum.

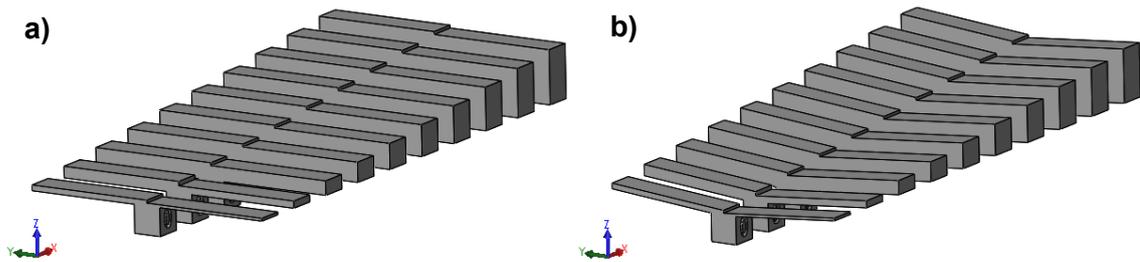


Abbildung 43 Demonstratoren zur Untersuchung der kritischen Überhanglänge mit Downskin-Winkel a) 0° und b) 5° zur Bauebene

Untersucht werden bei diesen Demonstratoren der Einfluss der Aufbauhöhe und folglich der Energieeintragung bei typischerweise zu stützenden Strukturen. Im Ergebnis sind die Längen der unverformten T-Strukturen untersucht worden.

Der Bauzyklus zur Fertigung der Strukturen ist ohne Abbruch beendet worden. Es traten allerdings starke Verformungen an den Prüfkörpern auf. Wenngleich die Strukturen des Sollwinkels 0° vorrangig Verformungen im äußeren Bereich der Schenkel und an der Unterseite des Bauteils aufweisen, treten die Verformungen bei den 5° Winkeln über die gesamte Länge auf. Teilweise sind diese an der Oberfläche so stark verformt, dass der Rakel beschädigt wurde. In Abbildung 44a und b erfolgt die Darstellung der gefertigten Demonstratoren mit Winkeln von 5° beziehungsweise 0° sowie deren Aufbaurichtung.



Abbildung 44 Formabweichungen der Demonstratoren mit Downskin-Winkel a) $\delta = 5^\circ$ und b) $\delta = 0^\circ$ zur Untersuchung der kritischen Überhanglänge

Zur Ermittlung der ebenen kritischen Länge der Downskin-Fläche wurden die Körper optisch gescannt. Als Kriterium zur Verformungsermittlung ist die Länge des Schenkels herangezogen worden, bei welcher die Unterseiten der Demonstratoren weniger als

$\pm 0,1$ mm von der Sollstruktur abweichen. Die typischen Abweichungen der Downskin-Fläche (vgl. Abschnitt 4.4.3, 4.4.5 und 4.4.9) werden hierbei als systematisch angenommen und allein die überlagerten Abweichungen aufgrund der Verformung der Fläche berücksichtigt. In Abbildung 45 sind die Messergebnisse der Demonstratoren dargestellt. Die Registrierung aller Körper erfolgte featurebasiert über den Standfuß.

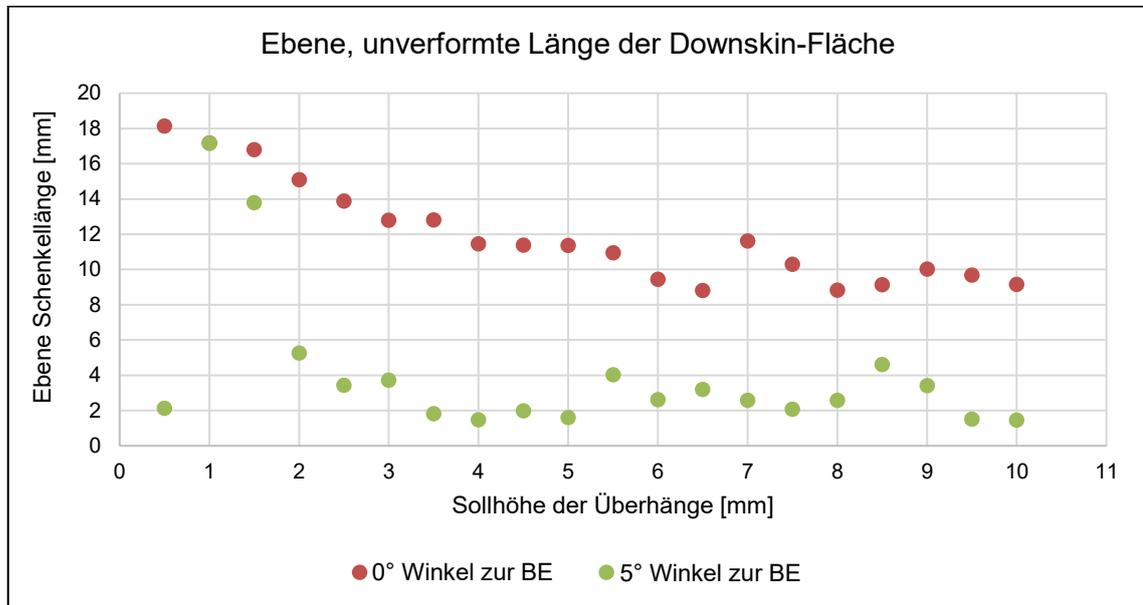


Abbildung 45 Länge der ebenen Downskin-Fläche in Abhängigkeit der Höhe der Demonstratoren

Bei den Demonstratoren, deren Schenkel parallel zur Bauebene verlaufen, sind die Verformungen von der Höhe des darüberliegenden Volumens abhängig. Bei steigender Bauhöhe verringert sich die unverformte Länge der Unterseiten. Trotz der steigenden Länge der Formabweichungen und der maximalen Verformung in Z-Richtung von bis zu 1,74 mm werden diese an der Oberseite der Demonstratoren bis auf kleine Anhebungen der Schenkelenden kompensiert. Anders zeigt sich das Verhalten bei einem Überhangwinkel von 5°. Ausgenommen der Sollhöhe von 1 mm und 1,5 mm sind die Unterseiten nach gemittelten 2,75 mm kritischer Länge l_{krit} dem Kriterium entsprechend ausreichend verformt. Ferner wirken sich die Abweichungen bis an die Oberseite der Strukturen aus, so dass diese im Laufe des Bauprozesses die Pulverauftragsebene überragen und den Raketel beschädigen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen in Abschnitt 4.6.1 sind die Verformungen der T-Strukturen konvex.

4.6.3 Zwischenfazit und Diskussion

Die Fertigung von Überhangstrukturen unterhalb des kritischen Überhangwinkels und der kritischen Überhanglänge ohne Stützstruktur führt zu Verformungen. Diese können beginnend bei der Unterseite der zu fertigenden Struktur bis hin zu Oberseite sichtbar im Bauteil verbleiben. Die Verformungen beginnen ab einer kritischen Überhanglänge

> 2 mm und Winkeln $0 < \nu < 35^\circ$. In vergleichbaren Untersuchungen sind kritische Überhangwinkel von 30° erreicht worden, wobei die detaillierte Prozessführung unbekannt ist (Grandvallet et al. 2018). Wenngleich der Demonstrator aus Abschnitt 4.6.2 durchgängig konvexe Krümmungen zeigt, sind diese für die Strukturen in Abschnitt 4.6.1 vorrangig konkav, was eine Abhängigkeit zwischen Strukturverlauf und Verformungsart vermuten lässt.

Speziell bei Überhängen parallel zur Bauplatte zeigt sich ein anderes Verhalten. In Abhängigkeit der darüberliegenden Struktur weicht die Form des Demonstrators am nicht gestützten Ende der Unterseite ab. Zu Beginn der Überhänge sind keine Verformungen ersichtlich. Ab einer bestimmten Länge treten Formabweichungen auf. Bei der gesamten Überhanglänge von 20 mm ist ausgehend von den Ergebnissen aus Abbildung 45 die unverformte Länge des freien Überhangs bei bauebenenparallelen Downskin-Flächen ≥ 9 mm. Besitzen diese einen Winkel $> 0^\circ$, treten bereits bei ca. 3 mm Verformungen ein.

4.7 Einfluss der Stützstruktur auf die Bauteilqualität

Bei der Verwendung von Support sind möglichst prozessstabile und einfach entfernbare Strukturen zu bevorzugen. Um deren Gestalt zu untersuchen und zu optimieren, werden Demonstratoren mit einem Überhangwinkel von 5° auf unterschiedlichen Stützstrukturen entsprechend Abbildung 46 untersucht. Zu deren Beschreibung sei auf Anlage A-17, S. 231 verwiesen. Ziel ist es, die durch kommerzielle Software ermöglichten, automatisch erstellbaren Stützstrukturtypen und -parameter zu untersuchen und Empfehlungen zum Typ sowie dessen optimalen Parametern zu entwickeln. Die Versuchskörper sind mit der Q20plus gefertigt worden. Der Support aller Körper bis auf die Nummern 6, 7, 8 und 10 ist nicht mit der Bauplattform verbunden, da softwareseitig keine automatische Erstellung ohne Anbindung an die Grundplatte nutzbar ist. Die Länge des Supports beträgt bei diesen 10 mm und bei allen nicht mit der Bauplattform verbundenen Supports 15 mm, um den möglichen Einfluss eines zu kurzen Supports zu eliminieren.

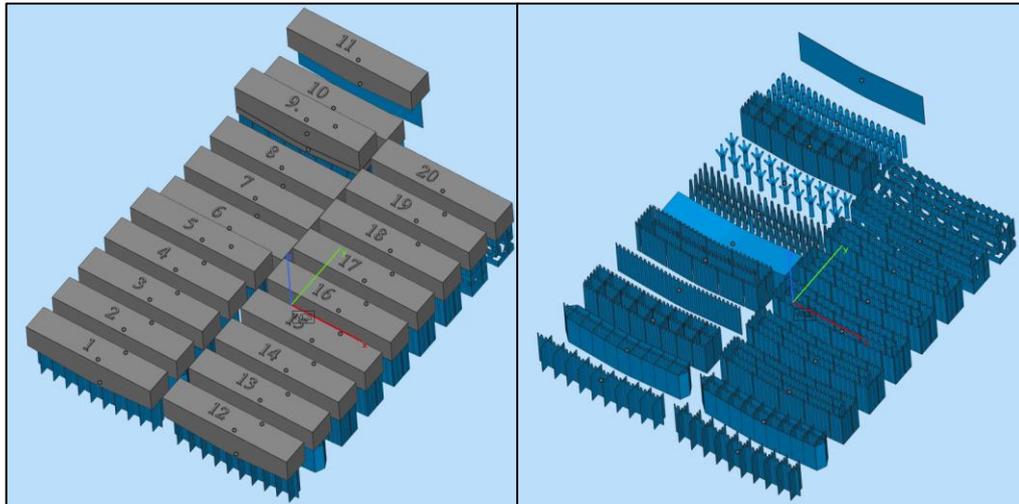


Abbildung 46 Nummerierung der Probekörper (links) und deren jeweilige Stützstrukturgeometrie (rechts)
 Alle Testkörper wurden in dem Pulveraufbereitungssystem von Überschusspulver befreit. Zur Analyse der Varianten sind drei Bewertungskriterien untersucht worden.

1. Entfernbarkeit

Diese beschreibt die subjektive Bewertung der händischen Entfernbarkeit des Supports in Abhängigkeit des Zeit- und Kraftaufwandes, sowie zusätzliches Entfernen von Pulverrückständen. Die Punktevergabe erfolgt von 0 (nicht vollständig entfernbar) bis 4 (sehr einfach).

2. Zahnreste

Brechen Stützstrukturen nicht direkt am Bauteil, verbleiben Zahnreste, die zu Abweichungen führen. Die Höhe der Zahnreste wird gemessen und daraus ein Wert zwischen 0 (große Erhebungen durch Zahnreste) und 4 (keine messbaren Erhebungen) erzeugt.

3. Verzug

Bei ungenügender Wärmeabfuhr sind Bauteilverformungen zu erwarten. Diese wird gemessen und geringer der Verzug erscheint, desto höher ist dessen Bewertung zwischen 0 und 4.

Die Punktevergabe der Zahnreste und des Verzugs erfolgt durch bereichsweise Einteilung der auftretenden, gemessenen Abweichungen. Zur detaillierten Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Testkörper sei auf Anlage A-18 und Tabelle 30, S. 232 verwiesen. Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse der Bewertung der Stützstrukturgestalt.

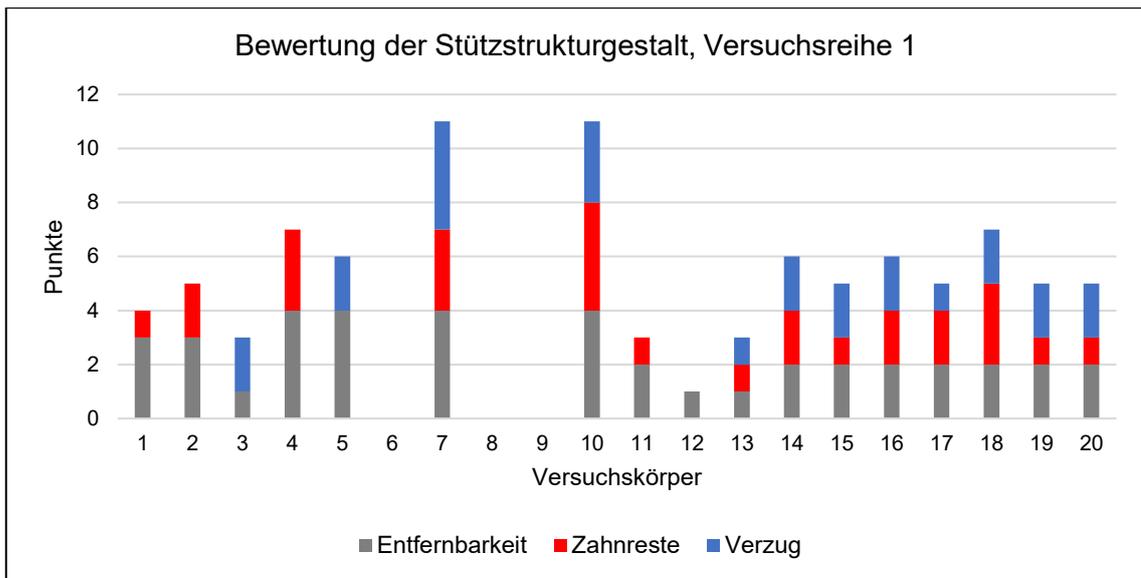


Abbildung 47 Ergebnisse der Bewertung einzelner Stützstrukturformen der ersten Versuchsreihe

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Änderung der Supportgestalt Einfluss auf die Genauigkeit und nachgelagerte Bauteilbearbeitung hat. Die Probekörper 7 und 10, jeweils mit einzelnen kegel- beziehungsweise stiftförmigen Supports, zeigen die höchste Punktzahl bei allen Bewertungskriterien. Probekörper 6 und 9, welche jeweils über einen Spalt die Wärme abtransportieren sollten, sind mit dem Support verschmolzen und bei Körper 8 ließ sich dieser nicht vollständig entfernen. Diese erhielten dadurch keine Werte.

Auf Basis der ersten Versuchsreihe werden weitere Parameteranpassungen der Spalt- und Stift-Supports durchgeführt, um die Machbarkeit nachzuweisen und Parameter zu optimieren. Der Spalt ist auf 0,6 mm; 0,8 mm und 1 mm vergrößert worden. Die Stifte sind softwareseitig als Volumenkörper ausgeführt und mit der Bauplatzform verbunden. In der zweiten Versuchsreihe werden die automatisch erstellten Stifte manuell von der Grundplatte gelöst und als hohle, offene Körper dargestellt. Der Abstand der Supportstruktur SLa beträgt 2 mm und 4 mm zueinander und deren Länge $Sh = 15$ mm. Abbildung 48 zeigt die hergestellten Strukturen.

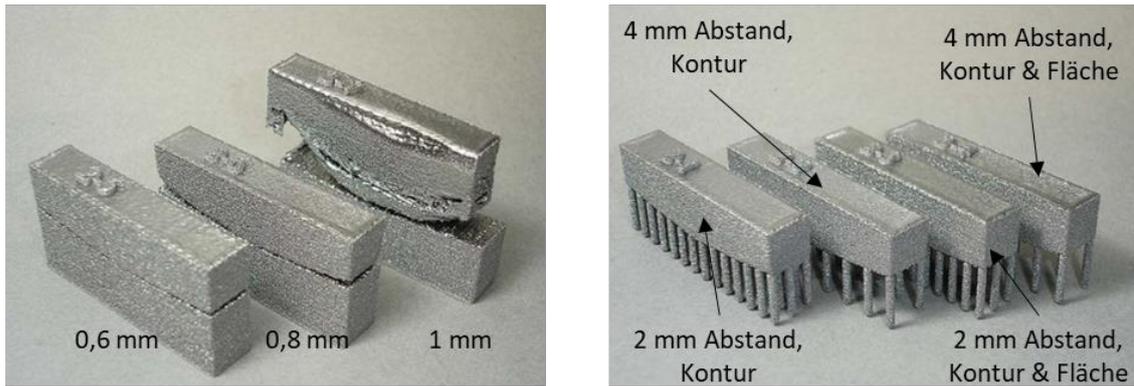


Abbildung 48 Hergestellte Testgeometrien der Spaltuntersuchung (links) und die Stiftparametervariation (rechts) der Versuchsreihe 2

Wenngleich der Spalt g_z bis 0,8 mm sichtbar entstanden ist, waren die Körper mit deren Support verbunden. Bei $g_z = 1$ mm konnten beide getrennt werden, allerdings trat starker Bauteilverzug auf. Eine Machbar- und Anwendbarkeit ließ sich dadurch nicht nachweisen.

Bei den Stiften erfolgte die Supporterstellung im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe derart ungünstig, so dass an der jeweils kurzen Seite drei beziehungsweise zwei Stifte entstanden. Der resultierende Verzug ist außerhalb des Bewertungsbereichs der ersten Versuchsreihe, weshalb dieses Kriterium in der zweiten Versuchsreihe keinen Wert erzeugt. Die Erstellung der Stifte erfolgt in einer dritten Versuchsreihe manuell, so dass jeweils vier beziehungsweise fünf Stifte über die kurze Seite verteilt sind. Ferner ist dabei untersucht worden, inwieweit eine dichte Verteilung an Konturen bei gleichzeitig sporadischer Verteilung über die Fläche Einfluss hat. Die Ergebnisdarstellung der Versuchsreihen 2 und 3 erfolgt in Abbildung 49. Zur Betrachtung der Messergebnisse sei auf Tabelle 31 in Anlage A-18, S. 234 verwiesen.

Werden die Stifte entsprechend mit einem Abstand $2 \text{ mm} \leq SLa \leq 3 \text{ mm}$ gepackt, erhöht sich die Genauigkeit, da der Verzug reduziert wird. Die Entfernbareit der Stifte ist vernachlässigbar gering beeinflusst, da sich die Stifte grundlegend einfach entfernen lassen. Die manuelle Stiftsupporterstellung erlaubt zudem neue Stiftparameter, so dass die Zahnreste verringert werden konnten.

Infolgedessen ist eine Anwendung entwickelt worden, welche die Stützstrukturerstellung von prozessoptimalen, parametrisierbaren Stiften im Konstruktionsprogramm ermöglicht. Zur detaillierten Beschreibung dieser Anwendung sei auf die entsprechende Veröffentlichung verwiesen (Süß et al. 2018a).

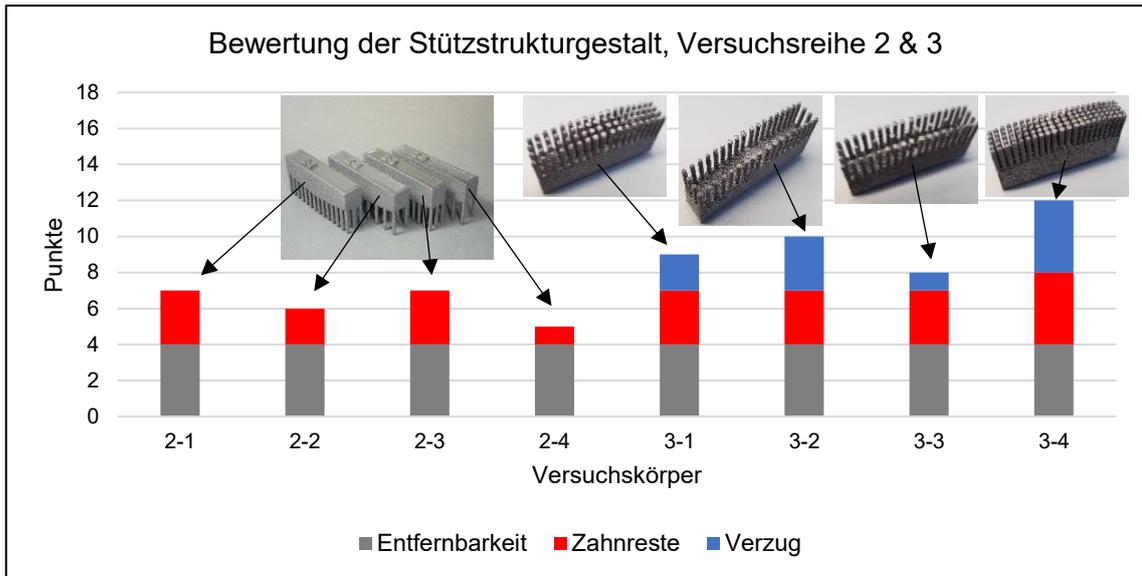


Abbildung 49 Ergebnisdarstellung Stifte als Stützstruktur der Versuchsreihen 2 und 3

4.8 Minimalmaß lasttragender Strukturen

Neben den fertigen Möglichkeiten des EBM gibt es weitere Flächen- und Struktureigenschaften, die Potenziale sowie Nachteile für den Konstruktionsprozess darstellen. Im Speziellen sind hierbei lasttragende, schmale Strukturen im Fokus, welche beispielsweise für Gitterstrukturen angewendet werden. Im Folgenden wird unter Beachtung der Rauheit die Festigkeit dieser schmalen Strukturen untersucht.

4.8.1 Festigkeit schmaler Strukturen

In Anbetracht der Empfehlung, funktionale Strukturen wie beispielsweise Gitterstrukturen zur Gestaltung additiver Bauteile zu verwenden (vgl. Abschnitt 2.3), ist die Beachtung der damit einhergehenden Bauteileigenschaft relevant. Fertigungstechnisch ist beim EBM zudem die Entfernbarkeit des angesinterten Pulvers zu berücksichtigen.

Da mitunter im Ergebnis von Strukturoptimierungen sowie bei Gitterstrukturen schmale Struktur厚dicken resultieren, wird im Zuge der Arbeit die Festigkeit in Abhängigkeit des Strukturquerschnitts untersucht. Hierzu werden jeweils 5 Rundzugproben mit den Prüfdurchmessern 1 mm; 2 mm; 3 mm und 4 mm sowie Abmessungen B4x20 entsprechend DIN EN ISO 6892-1, welche entlang der Z-Richtung hergestellt wurden, untersucht. Um den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Probengrößen zu vergleichen, werden 5 weitere Proben mit den Durchmessern 2 mm; 3 mm; 4 mm und 5 mm mittels elektrochemischer Glättung bearbeitet. Erwartete Abtragungen dieses Prozesses sind ca. 0,3 mm pro Oberfläche für LBM-Proben (vgl. Bagehorn et al. 2016).

Da die Ausgangsrauheit für EBM höher ist, wurden aufgrund des folglich höheren Abtrags im Durchmesser 1 mm Aufmaß vorgesehen. Ferner sind die geglätteten Durchmesserproben mittels HIP thermisch bearbeitet worden, um den Einfluss von Poren auszuschließen. Tabelle 7 zeigt den Probenumfang für die Durchmesservariation. Die Farbgebung fasst jeweils den Probenumfang einer Konfiguration zusammen und spiegelt sich in der Ergebnisdarstellung in Abbildung 50 wider. Zum Ergebnisvergleich sind Proben mit gleichen Prozessparametern und den in DIN EN ISO 6892-1 beschriebenen Endbearbeitungsschritten mit und ohne Wärmebehandlung (WB) geprüft worden.

Tabelle 7 Beschreibung der Versuche zur Festigkeit schmaler Strukturen

Proben	Wärmebehandlung (WB)		unbearbeitet				elektrochemisch geglättet				Σ
			Ø [mm] wie-gebaut				Ø [mm] wie-gebaut				
Nummer	glühen / HIP		1	2	3	4	2	3	4	5	
1.1	WB1: geglüht (710 °C über 2 Stunden) + HIP (920 °C bei 1000 bar über 2 Stunden)	Anzahl Proben je Maß	1	1	1	1	1	1	1	1	8
1.2			1	1	1	1	1	1	1	1	8
1.3			1	1	1	1	1	1	1	1	8
1.4			1	1	1	1	1	1	1	1	8
1.5			1	1	1	1	1	1	1	1	8
2.1	WB2: geglüht (710 °C über 2 Stunden)		1	1	1	1					4
2.2			1	1	1	1					4
2.3			1	1	1	1					4
2.4			1	1	1	1					4
2.5			1	1	1	1					4
		Σ	5+5	5+5	5+5	5+5	5	5	5	5	60

Die Darstellung der Zugprobenergebnisse mit verringertem Durchmesser erfolgt in Abbildung 50. Die punktierten Linien stellen die Werte jeder Messgröße nach DIN 17864 dar. Der E-Modul ist dem Maßstab entsprechend mit dem Faktor 10 angepasst worden. Normproben, welche ohne WB geprüft wurden, erhalten die Kennzeichnung WB0.

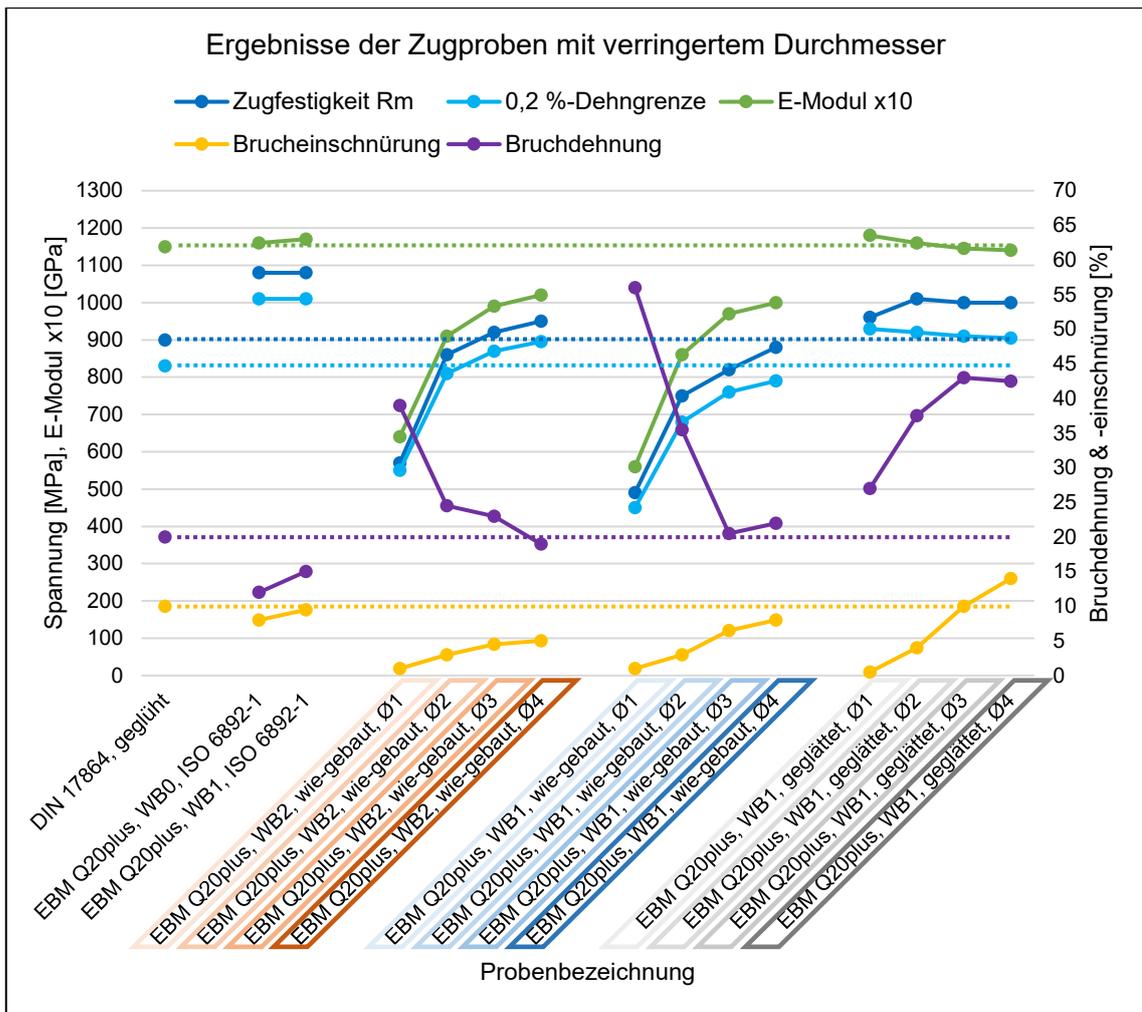


Abbildung 50 Festigkeit schmaler Strukturen in Abhängigkeit des Zugprobendurchmessers und der Nachbearbeitung

Die Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften vom jeweiligen Querschnitt. Eine signifikante Änderung der Eigenschaften bei Verringerung des Probendurchmessers ist vorrangig bei den Proben ohne Glättung ersichtlich. E-Modul, Zugfestigkeit und Streckgrenze fallen signifikant ab. Die Bruchdehnung und -einschnürung nehmen hingegen zu. Ferner ist der Einfluss der Wärmebehandlung bei diesen Ergebnissen marginal, wenngleich die mittels WB2 behandelten Zugproben mit 3 mm und 4 mm Durchmesser Festigkeitswerte im Bereich der Norm beziehungsweise darüberliegend erzielen. Für Proben, die nicht der WB2 unterzogenen wurden, ist ausschließlich der Probendurchmesser von 4 mm annähernd im Bereich der genormten Zielgrößen.

Die elektrochemisch geglätteten Proben zeigen geringe Schwankungen durch Querschnittsvariation. Wenngleich die Ergebnisse des maschinell nachbearbeiteten Normzustandes nicht vollumfänglich erreicht werden, ist der Unterschied gering. Einzig

die Bruchdehnung erscheint erhöht. Bis auf die Brucheinschnürung der Proben ≤ 3 mm sind die Werte entsprechend DIN 17864 erreicht worden.

4.8.2 Zwischenfazit und Diskussion

Der Einfluss der Rauheit ist im Zuge des EBM nicht zu vernachlässigen. Primär sind funktionale Oberflächen sowie deren Form- und Lagetoleranzen davon beeinflusst.

Neben den geometrischen Auswirkungen hat die Rauheit bei schmalen Leichtbaustrukturen Einfluss auf die Material- und folglich Bauteileigenschaften. Je schmaler der Querschnitt, desto höher ist der Einfluss der rauen und folglich vielgekärbten Oberfläche. Bei Durchmessern < 4 mm im wie-gebaut Zustand sind Änderungen der Belastungseigenschaften zu erwarten. Je nach Grad der Rauheitsminderung lässt sich der Einfluss der Querschnittseinschnürung auf die Festigkeitseigenschaften nahezu vermeiden. Es konnte nicht abschließen geklärt werden, ob diese ungerichtete Oberflächenglättung die Unterschiede zum Normzustand verursachen. Ferner ist der Abtrag nicht gemessen und auf 0,8 mm im Durchmesser geschätzt worden. Rechnerisch wurden die Werte allerdings auf 1 mm Abtrag normiert. Infolgedessen sind die realen Werte der geglätteten Proben geringer als in Abbildung 50 dargestellt.

Die Ergebnisse der Bruchdehnung zeigen teilweise starke Abweichungen zum Normzustand. Die Gründe dafür sind nicht eindeutig. Mitunter weisen die Proben eine geringe Welligkeit auf, welche durch die Prüfung gestreckt wird und wodurch die Dehnung erhöht und der E-Modul gering erscheint. Dies erklärt allerdings nicht die hohe Bruchdehnung der geglätteten Proben bei nahezu identischem E-Modul verglichen mit der Norm.

4.9 Gestaltungsempfehlungen für EBM

In diesem Abschnitt erfolgt die Eingliederung des EBM in die Allgemeintoleranzen und die Zusammenfassung der Ergebnisse zu einem Konstruktionskatalog. Ursachen bestimmter Verfahrensgrenzen und Geometrieabweichungen sowie deren mögliche Vermeidungsstrategien werden abschließend dazu diskutiert und dargestellt.

4.9.1 Geometrische Genauigkeit und Allgemeintoleranz des EBM

Die Abweichung beim EBM bei dem untersuchten MAPS ist von der Struktur des herzustellenden Bauteils, der Form, Position und Orientierung der relevanten Geometrien im Bauraum abhängig. Mit den Ergebnissen der bauraumabhängigen Abweichungen aus Abschnitt 4.3 sowie den Geometrieuntersuchungen der Abschnitte

4.4 bis 4.6 lässt sich das EBM-Verfahren nach DIN ISO 2768-1 in die Kategorie c eingliedern. Die Kantenüberhöhungen beim Konturschmelzen, der Treppenstufeneffekt sowie Verformungen trotz Stützstrukturen und bei Materialanhäufungen ist eine Eben- und Geradheit von allgemeinen Flächen nicht charakterisierbar. Hierfür sind spezifische Betrachtungen der Randbedingungen wie Orientierung und konstante Wandstärken zu definieren. Die Höhe der jeweiligen Abweichungen durch die genannten Effekte lässt eine Einordnung in die Toleranzklasse L nach DIN ISO 2768-2 erwarten.

Bei Betrachtung der Grundtoleranzgrades nach ISO 286-1 ist das EBM mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit für kleine sowie große Nennmaße in den Bereich IT12 bis IT15 einzuordnen. Je nach Messverfahren und -strategie, Art der Struktur sowie Skalierungsfaktoren können höhere und geringere Toleranzgrade erreicht werden. Die Einordnung deckt sich mit Aussagen aus der Literatur und ist zudem vergleichbar mit anderen metallpulverbettbasierenden additiven Verfahren (Dolimont et al. 2015; Lieneke et al. 2015).

4.9.2 Konstruktionskatalog für das EBM

In den vorangegangenen Abschnitten sind verschiedene Ergebnisse zu herstellbaren Geometrien, deren Abweichung sowie Einflüsse auf die Bauteileigenschaften erarbeitet worden. Zusammengefasst werden diese und die daraus resultierenden Empfehlungen für die Bauteilgestaltung in einem Konstruktionskatalog (vgl. Abschnitt 2.4.2). Grundlegend wird in drei Gliederungsebenen unterschieden. Ausgehend eines Hauptprozessschrittes bei der Gestalterzeugung wird über bestimmte Grundelemente bis hin zur Featureebene differenziert. Anhand der Gliederung werden Beispiele für eine ungünstige und günstige Umsetzung einzelner Features dargestellt und Werte, Erläuterungen sowie Hinweise zu deren Erzielung genannt. Dieser Katalog wird zudem um Implikationen aus Abschnitt 2.2.2 ergänzt. Der Geltungsbereich der spezifischen Werte bezieht sich auf die Nutzung des Ti6Al4V bei den genannten Anlagen und Prozessparameter nach Abschnitten 4.1. In Tabelle 8 ist der Konstruktionskatalog für das EBM in gekürzter Form ausschließlich mit den Grenzwerten und Empfehlungen zu einzelnen Features dargestellt. Zur detaillierteren Beschreibung sei auf den ausführlichen Konstruktionskatalog für das EBM mit Ti6Al4V in Tabelle 32 in Anlage A-19, S. 235 ff. verwiesen.

Tabelle 8 Gekürzte Form des Konstruktionskataloges für EBM

		Gliederungsteil		Nummer	Grenzwerte & Empfehlungen
Hauptprozessschritt	Grundelemente	Featureebene			
Gestaltung	Allgemeine Bauteildimensionen	Abmessungen		1	Bauraumbegrenzt
		Gestaltungsansatz		2	Bauraummaximiert
		Maßhaltigkeit und Positionsabweichungen		3	Z: -0,5 mm bis 2 mm XY: 0 mm bis 1,5 mm
		Kantenauflösung		4	0,3 mm Eckenradius
		Materialanhäufungen		5	Schlanke Strukturen
		Strukturübergänge		6	Stetig, nicht spontan
	Hohlräume	Gestaltung		7	Kein Hinterschnitt
		Pulverentfernung		8	Kanal ≥ 5 mm
	Radien und Rundungen	Überhangradien		9	Radius < 4 mm
		Orientierung		10	In XY-Ebene
	Wandungen	Minimale Wandstärke		11	$t \geq 0,6$ mm
		Lasttragende Wandstärke		12	$t > 3$ mm
	Bohrungen	Minimale Bohrungsgröße		13	$d \geq 0,8$ mm
		Bohrungstyp		14	Durchgängig
		Orientierung		15	Entlang Z-Richtung
		Positionierung		16	Nachzubearbeiten
	Zylinder	Minimaler Zylinderdurchmesser		17	$D \geq 0,6$ mm
		Lasttragender Zylinderdurchmesser		18	$D > 3$ mm
	Spalte	Minimale Spaltmaße		19	$g_{XY} \geq 0,8$ mm
		Funktionalität		20	Nachzubearbeiten
	Überhänge	Kritischer Überhangwinkel		21	$\delta_{krit} < 50^\circ$
		Freitragende Überhanglänge		22	$l_{krit} > 3$ mm
		Freitragender Bohrungsdurchmesser		23	$d \leq 8$ mm
		Bauebenenparallele Überhänge		24	Randsupports
	Support-/ Stützstrukturen	Bauteilanbindung		25	Einzelne Pins
		Abstand der Strukturen		26	$2 \text{ mm} \leq SLa \leq 6 \text{ mm}$
		Länge der Strukturen		27	$5 \text{ mm} \leq Sh \leq 20 \text{ mm}$
		Zugänglichkeit		28	Kein Hinterschnitt
		Stützstrukturgestalt		29	Stiftsupports

Tabelle 8 Gekürzte Form des Konstruktionskataloges für EBM (Fortsetzung)

Gliederungsteil			Nummer	Grenzwerte & Empfehlungen
Endbearbeitung	Allgemein	Übermaß	30	DIN EN ISO 2786-1c + 0,5 mm
		Bearbeitungsflächen	31	Einheitliche Bearbeitungsebene
		Einspannung	32	Nahe an der Wirkstelle
		Referenzflächen	33	Nachzubearbeiten
	Mechanische Nachbearbeitung	Drehen, Fräsen, Bohren	34	Zugänglichkeit berücksichtigen
		Gewinde	35	Nachzubearbeiten
	Oberflächenqualität	Glättung der Oberfläche	36	Funktionsabhängig, Aufmaß vorsehen
Planung des Bauzyklusses	Positionierung von Bauteilen	Anbindung an die Bauplattform	37	Ist zu vermeiden
		Position auf der Bauplatte	38	Bauplattenmitte
		Anzahl an Bauteilen	39	Maximieren
		Abstände der Bauteile zueinander	40	$g_{XY} > 0,6 \text{ mm}$ $g_Z \geq 0,8 \text{ mm} + \text{Support}$
	Orientierung von Bauteilen	Oberflächenrauheit	41	$Ra = 5 \mu\text{m} - 57 \mu\text{m}$
		Materialzuwachs an Überhängen	42	Angesintertes Material an Unterseite $\approx 0,4 \text{ mm}$
		Aufbauhöhe	43	Möglichst flach
		Allgemeine Anmerkungen	44	Hauptziel: kurzer, verformungsfreier Bauprozess

4.9.3 Diskussion und Implikation der Ergebnisse

Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen bestimmte systematische Abweichungen und Abhängigkeiten, die in diesem Abschnitt diskutiert werden.

4.9.3.1 Größenabweichungen der Anlage Arcam A2X

Die Ergebnisse aller Strukturen, die mit der Anlage Arcam A2X hergestellt wurden, zeigen systematische Abweichungen bei Messungen parallel zur Bauebene. Die Abweichungen betragen pro Oberfläche in Abhängigkeit des Messverfahrens und der Oberflächenkrümmung ca. -0,05 mm bis -0,15 mm. Dadurch erscheinen die gefertigten,

additiven Strukturen wie Wände und Zylinder zu schmal. Gleichmaßen zeigen subtraktive Strukturen wie Bohrungen und Spalte größere Weiten. Da dies unabhängig von der Größe der Sollstruktur ist und nicht bei gefertigten Bauteilen der Q20plus auftritt, lässt sich auf die Prozessführung der A2X schließen. Der Prozessparameter Contour-Offset, der den Abstand zwischen STL-Oberfläche und der Scanlinie der äußeren Bauteilkontur beschreibt, besitzt hierbei Relevanz (vgl. Abbildung 8, S. 26). Es ist zu prüfen, ob dieser Wert zu den Abweichungen führt.

4.9.3.2 Formabweichung bei Überhangstrukturen

Ausgehend von den Ergebnissen des Abschnitts 4.6 lässt sich eine Abhängigkeit des Überhangwinkels zur Art der Verformung erkennen. Speziell der Unterschied der Krümmungsart bei angewinkelten Strukturen sowie das Verformungsverhalten bei Überhangflächen parallel zur Bauplatte ist zu diskutieren. Strukturen, deren Sollwinkel der Downskin-Fläche im Bereich von 26° bis 35° liegen, zeigen konkave Verformungen. Bei Winkeln von 5° sind diese durchweg konvex.

Um speziell bei Überhängen die Energieeinbringung zu verringern und das Überhitzen zu vermeiden, wird die Thickness-Function (TF) genutzt (vgl. Abschnitt 2.2.2.3). Diese beeinflusst allerdings ausschließlich das Flächenschmelzen. Das Konturschmelzen ist dadurch nicht beeinflusst (Smith et al. 2016). Durch die Schichtzerlegung der Demonstratoren bei einem Winkel $> 0^\circ$ erfolgt jeweils mehrfaches Konturschmelzen der Überhangflächen, wohingegen bei 0° ausschließlich die Kanten betroffen sind. Abbildung 51 verdeutlicht den Zusammenhang. Die Thickness-Function reguliert dabei ausschließlich den Wärmeeintrag der flächigen Schmelzbereiche. Für eine weiterführende Beschreibung der TF und den Einfluss des Konturschmelzens sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Smith et al. 2016).

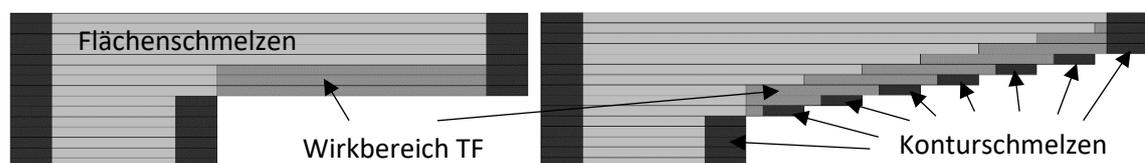


Abbildung 51 Wirkbereich der TF in Abhängigkeit des Strukturverlaufs bei Downskin-Flächen bauebenenparallel (links) und mit einem Winkel $> 0^\circ$ zur Bauebene (rechts)

Dadurch ist der signifikante Unterschied zwischen Strukturen bei 0° und 5° beschreibbar. Dennoch überhitzen die Überhänge bei 0° Winkeln an deren freien Ende. Als Grund dafür ist neben dem dortigen Konturschmelzen der verringerte Wärmeabtransport zu nennen. Durch die dadurch verringerte Abkühlrate verfestigt die Struktur bei höheren Temperaturen. Diese Differenz zur Vorheiztemperatur führt zur Schwindung der Schichten im Prozess. Schwindungskräfte der aktuell geschmolzenen Schicht wirken auf

die darunterliegenden, bereits geschwundenen Schichten. Eine Art Bimetallstreifen-Effekt tritt auf, wodurch sich das freie Ende in Baurichtung verformt.

Das vergleichsweise ungehinderte Konturschmelzen führt ferner zu den Formbeziehungsweise Maßabweichungen an den Unterseiten des Bauraumdemonstrators in Abbildung 19, S. 71, an den bauebenenparallelen Zylindern und den Rändern der Bohrungen, Überhänge sowie Rohröffnungen in den Abschnitten 4.4.3, 4.4.5, 4.4.9 und 4.5.2. Das Schmelzen der Konturbereiche führt zu einem erhöhten Energieeintrag, wodurch zusätzliches Pulver an den Unterseiten von Zylindern sowie den Randbereichen bauebenenparalleler Überhänge ansintert.

Im Gegensatz zur Verringerung der einzubringenden Energie beziehungsweise Wärme ist eine ausreichende Abkühlung nicht direkt über Parameter steuerbar. Über Berechnungen der Anlagensoftware zu Prozessbeginn mit dem Ziel einer ausreichend Vorheiztemperatur werden Vorheizprozess und -zeit sowie mögliche Zwischenheitzschritte ermittelt. Die Abkühlung durch beispielsweise Verzögerungen beim bereichs- oder schichtweisen Schmelzen ist nicht direkt beeinflussbar. Bei kleinen Schmelzflächen führt dies dazu, dass kurze Schichtzeiten resultieren. Durch ungenügende Abkühlung der Schicht treten lokale Überhitzungen auf. Erhöht sich die Schmelzfläche, verlängert sich die Schicht- und Abkühlzeit der Struktur. Der Winkeldemonstrator aus Abschnitt 4.6.1 zeigt an den Winkeln 26° bis 35° zu Strukturbeginn den überhitzungsbedingten, sich in Baurichtung verformenden Verlauf. Mit steigender Bauhöhe verringert sich diese Verformung und die Strukturen nehmen zunehmend deren Sollverlauf an (vgl. Abbildung 42, S. 97). Daraus resultiert in Summe der konkave Verlauf. Da mit steigender Bauhöhe die Flächen der zu schmelzenden Geometrie zunehmen, lässt sich darauf schließen, dass die anfänglichen Überhitzungseffekte stabilisiert werden. Bei den Sollwinkeln 24° und 25° ist dies nicht erreicht worden. Zudem bilden diese Geometrien den seitlichen Abschluss des Bauteils, wodurch ein zusätzlicher Wärmestau auftritt.

Der Einfluss des Überhitzens der Struktur aufgrund geringer Schmelzfläche wird im Folgenden an einem weiteren Beispiel verdeutlicht. In Kooperation mit der Link GmbH ist zur Ermittlung von Skalierungsfaktoren ein Bauraumdemonstrator in Anlehnung an Abschnitt 4.3 für eine Arcam Q10 entwickelt, mittels Ti6Al4V hergestellt und analysiert worden. Die Strukturen mit Winkeln $\leq 40^\circ$ wurden mit Support abgestützt. Auf die Abweichungen des Bauteils wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen. Allerdings zeigten sich Verformungen der Strukturen bei Winkeln von ca. 52° bei einer bestimmten Bauhöhe. Diese traten ab der Höhe ein, wo sich die zu belichtende Fläche von 3229 mm^2

innerhalb einer Schicht auf 654 mm^2 verringerte. Die Verformung kumuliert bis zur nächsten Erhöhung der Schmelzfläche durch die Messkörper. In Abbildung 52 ist dies am CAD-Modell in Verbindung mit einem Foto und den zugehörigen Schichtbildern der LayerQam[®], welche die Abwärme des Bauteils mit entsprechend höherem Kontrast darstellt, abgebildet.

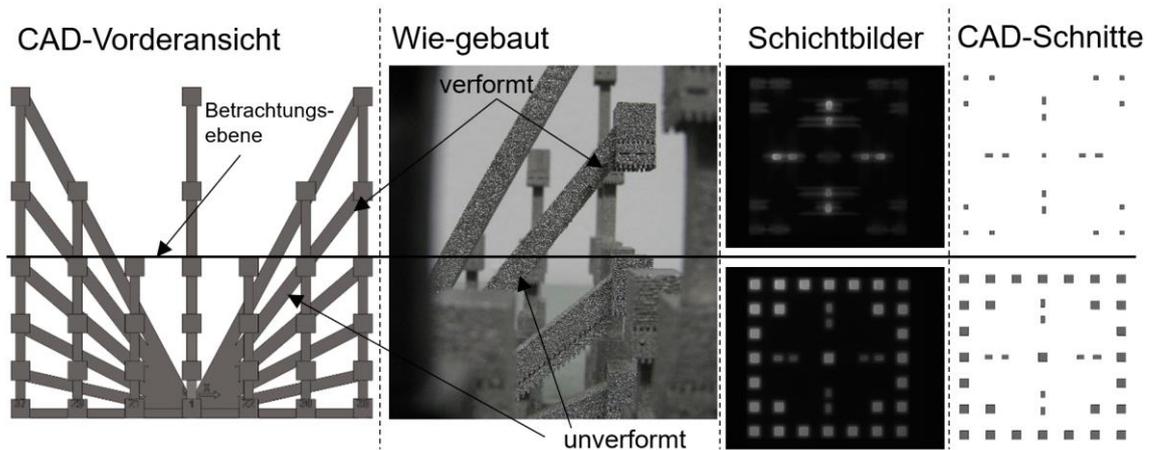


Abbildung 52 Formabweichung des Bauraumdemonstrators der Anlage Arcam Q10 in Abhängigkeit der zu belichtenden Schmelzfläche

Dies bestätigt die Annahme des Einflusses der zu schmelzenden Fläche auf den herstellbaren Überhangwinkel sowie die Stabilisierung bei größer werdenden Schmelzflächen.

Als Implikation ist festzuhalten, dass die Prozessparameter, Scanstrategie, zu schmelzende Fläche und die umliegenden Geometrien Einfluss auf die Wärmeentwicklung und folglich auf den jeweiligen kritischen Überhangwinkel haben. Wird dieser unterschritten, werden Stützstrukturen notwendig. Diese sind in bestimmten Abständen im Bereich der kritischen Überhangfläche vorzusehen. Eine Besonderheit tritt bei Überhängen mit Downskin-Flächen parallel zur Bauebene auf. Diese neigen an deren jeweiligen freien Ende zu Formabweichungen. An den Bereichen sind entsprechende Stützstrukturen notwendig. Eine Abstützung des flächigen Bereichs an diesen Strukturen erscheint nicht notwendig.

5 Angewandte Strukturoptimierung

Auf Basis der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Grundlagen zur Produktentwicklung für die additive Fertigung in Verbindung mit Möglichkeiten der Strukturoptimierung werden in diesem Abschnitt ausgewählte Fallbeispiele präsentiert. Der Fokus des Abschnittes adressiert im Speziellen die effiziente Anwendung der Strukturoptimierung im Zuge des Gestaltentwicklungsprozesses für EBM. Ferner werden die im vorangegangenen Abschnitt entwickelten Gestaltungsempfehlungen zur Optimierung und Konstruktion der Ergebnisse berücksichtigt. Tabelle 9 fasst die relevanten Merkmale zusammen, welche aus den Einflussfaktoren auf die Bauteilfertigung (vgl. Abschnitt 2.2.2) und dem Konstruktionskatalog (vgl. Anhang A-19, Tabelle 32, S. 235 ff.) Auswirkungen auf die Strukturoptimierung und Bauteilgestaltung besitzen. Weitere Einschränkungen sind im Zuge der nachfolgenden Topologieoptimierungsprozesse untersucht worden, erwiesen sich allerdings als nicht zielführend für die Strukturoptimierung.

Tabelle 9 Berücksichtigung der Gestaltungsempfehlungen für den Optimierungsprozess

Beschreibung der Einflussgröße	Folgen für die 1) Optimierung und 2) Konstruktion	Quellen
Die Orientierung von Strukturen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften.	1), 2) Die Strukturausrichtung hinsichtlich Festigkeitseigenschaften stellt kein Optimierungskriterium dar.	Abschnitt 2.2.2.1.1
Materialanhäufungen sind zu vermeiden.	1) Ein maximaler Strukturquerschnitt der Optimierung wird definiert.	A-19 Nr. 5
Die Erzielung von Form- und Lagetoleranzen ist nur durch Nachbearbeitung realisierbar.	2) Aufmaß und Zugänglichkeit an tolerierten Flächen sowie Aufspanngeometrien zur Nacharbeit sind zu berücksichtigen. Tolerierte Bohrungen werden geschlossen.	Abschnitt 2.4.3, A-19 Nr. 3, 16, 20, 30 – 34, 36, 37, 41
Stützstrukturen müssen nicht fest mit der darunterliegenden Struktur oder der Bauplatzform verbunden sein, wodurch sich diese einfach entfernen lassen.	1), 2) Die Strukturorientierung zur Vermeidung von Überhängen ist kein einschränkendes Kriterium.	A-19 Nr. 21, 22, 27
Die Zugänglichkeit zur Entfernung von Stützstrukturen ist vorzusehen.	1) Es dürfen keine unzugänglichen Hohlräume entstehen.	A-19 Nr. 3, 7, 28
Die Festigkeit zu schmaler Strukturen nimmt ab und spontan entstehende, große Schmelzflächen führen zu Verformungen.	1) Die minimale Strukturstärke ist zu begrenzen. 2) Strukturen sind größer als 3 mm zu dimensionieren.	A-19 Nr. 12, 18

5.1 Main Gear Bracket (MGB)

Das ‚Main Gear Bracket‘ (MGB) stellt eine Halterung des Hauptrotorgetriebes eines Helikopters dar. Durch insgesamt vier dieser Halterungen, wovon jeweils zwei spiegelsymmetrisch angeordnet und konstruiert sind, werden die translatorischen Kräfte des Rotorgetriebes in die Hauptstruktur des Helikopters eingeleitet. In der bisherigen Auslegung besteht dieses Bauteil aus zwei spanend hergestellten Einzelteilen sowie einer Hülse und vier Schrauben. 20 Nieten leiten die Kräfte über das MGB in die Rahmenstruktur weiter. Beide Einzelteile sowie die Baugruppe sind in Abbildung 53 dargestellt. Das ‚Upper Bracket‘ wird konventionell aus Stahl und das ‚Counter Bracket‘ aus Ti6Al4V gefertigt. Ziel dieser Optimierung ist die Konsolidierung der Baugruppe, die Gewichtsminimierung sowie die additive Fertigung mittels EBM.

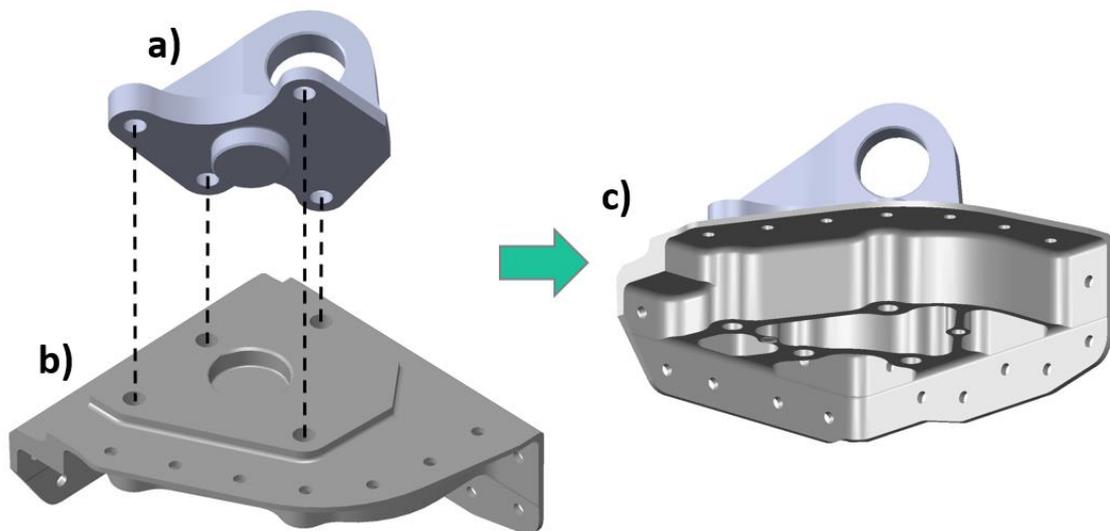
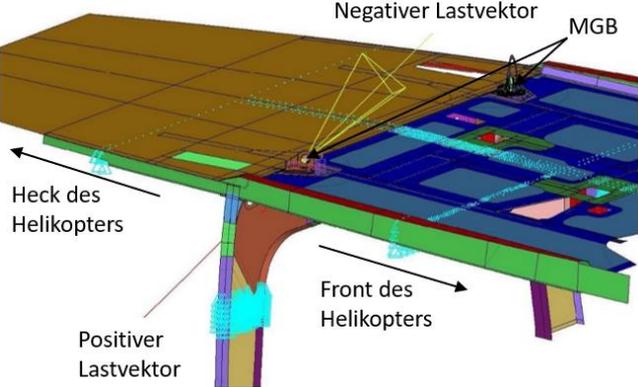


Abbildung 53 Darstellung des a) Upper Brackets und des b) Counter Brackets sowie des zusammengesetzten c) Main Gear Brackets

5.1.1 Auslegungsgrundlagen

Durch das Hauptrotorgetriebe werden sowohl statische als auch dynamische Kräfte in die Baugruppe eingeleitet und von diesem an die Tragstruktur des Helikopters übertragen. Der Vektor dieser Lasten ist identisch für alle Lastfälle, wenngleich die Vorzeichen variieren. Abbildung 54 stellt die entsprechenden auslegungskritischen Lasten sowie den Vektor der Lasteinleitung dar. Darin entspricht die gelb dargestellte Kraft dem ‚Crash Load‘ Lastfall und der Richtung aller negativen Lasten, die auf das MGB wirken, wohingegen der rote Pfeil den ‚Ultimate Load‘ Lastfall beziehungsweise die weiteren positiven Lasten darstellt. In Abbildung 54 ist rechts das Simulationsmodell der Rahmentragstruktur des Helikopters dargestellt.

Art	Lastfall	Kraft [N]
statisch	Limit Loads	65630
	Ultimate Loads	98445
	Crash Loads	-174670
dynamisch	High Cycle Fatigue (HCF)	Statisch: 35720 Dynamisch: ± 8784
	Low Cycle Fatigue (LCF)	Maximum: 44500 Minimum: -19630



Das Diagramm zeigt ein 3D-Modell der Rahmentragstruktur eines Helikopters. Es sind die Positionen des Heck des Helikopters (links) und der Front des Helikopters (rechts) markiert. Ein positiver Lastvektor (blau) wirkt nach unten auf die Front, während ein negativer Lastvektor (rot) nach oben auf die Heckpartie wirkt. Die MGB (Main Gear Box) ist ebenfalls positioniert. Die Struktur ist farblich in Blau, Grün und Rot dargestellt, was auf unterschiedliche Spannungszustände oder Materialbereiche hinweist.

Abbildung 54 Darstellung der Lasten (links) und Position sowie Lastrichtung des MGB im Simulationsmodell der Rahmentragstruktur (rechts)

Zu den beschriebenen Lasten sind die folgenden, vorgegebenen Nachweise zu erbringen.

Statische Belastung

- Limit Loads
Die auftretende Spannung muss unterhalb der Streckgrenze $R_{p0,2}$ bleiben.
- Ultimate Loads
Die Baugruppe sowie deren Nietverbinder dürfen nicht versagen. Die Zugfestigkeitsspannung R_m darf nicht überschritten werden. Die maximale ertragbare Last der Nieten beträgt 18500 N.
- Crash Loads
Die Baugruppe darf nicht versagen. Plastische Verformung ist erlaubt. Mehr als die Hälfte der Nietverbinder muss erhalten bleiben.

Dynamische Belastung

- Dauerfestigkeitsnachweis / High Cycle Fatigue (HCF)
Die Belastung durch die in Abbildung 54 beschriebenen Kräfte ergibt eine simulierte statische und dynamische Spannung $\sigma_{HCFstat}$ und σ_{HCFdyn} . Daraus wird eine äquivalente Spannung σ_{HCFeq} nach Gleichung (5.1) ermittelt (Lee 2005). Der Faktor γ ist abhängig vom Werkstoff und beträgt 0,65 für Ti6Al4V.

$$\sigma_{HCFeq} = \frac{\sigma_{HCFstat}}{1 - \left(\frac{\sigma_{HCFdyn}}{R_{p0,2}}\right)^\gamma} \quad (5.1)$$

Diese äquivalente Spannung wird mit der ertragbaren Dauerfestigkeitsspannung σ_{HCFzul} verglichen, woraus ein Sicherheitsbeiwert (Margin of Safety, $M.S.$) nach Gleichung (5.2) resultiert.

$$M.S. = \frac{\sigma_{HCFzul}}{\sigma_{HCFeq}} - 1 \quad (5.2)$$

Da die ertragbare Dauerfestigkeitsspannung zumeist unter optimalen Bedingungen ermittelt wird, sind Minderungsfaktoren in Abhängigkeit der Bauteilprüfung zu berücksichtigen.

- Zeitfestigkeitsnachweis / Low Cycle Fatigue (LCF)

Der Nachweis über die Zeitfestigkeit erfolgt ähnlich zur HCF mit einer maximalen und minimalen simulierten Spannung σ_{LCFmax} und σ_{LCFmin} , woraus statische und dynamische Vergleichsspannungen $\sigma_{LCFstat}$ und σ_{LCFdyn} nach Gleichung (5.3) und (5.4) resultieren.

$$\sigma_{LCFstat} = \frac{\sigma_{LCFmax} - \sigma_{LCFmin}}{2} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{LCFdyn} = \frac{\sigma_{LCFmax} + \sigma_{LCFmin}}{2} \quad (5.4)$$

Aus diesen wird identisch nach Gleichung (5.2) eine äquivalente Zeitfestigkeitsspannung σ_{LCFeq} ermittelt.

Zudem sind je nach Prüfzyklus und mithilfe entsprechender Materialkurven eine bestimmte Erlebenszeit beziehungsweise Anzahl an Lastzyklen nachzuweisen.

Zur Bewertung der additiven Auslegung werden die genannten Nachweise überprüft sowie die Ergebnisse der konventionellen Bauteilberechnung herangezogen.

5.1.2 Strukturoptimierungsprozess

Entsprechend des Ablaufes nach Abschnitt 2.3.3.2 und Abbildung 10, S. 37 wird eine FEM-Analyse in Verbindung mit der Strukturoptimierung durchgeführt. Folgende Kernaufgaben sind dabei zu lösen.

- Vereinigung der Baugruppe zu einem Bauteil
- Verringerung des Gewichts von ca. 2694 g der bisherigen Baugruppe
- Einhaltung der maximalen Spannungen von ca. 1000 MPa sowie den Nietkräften von 18500 N
- Erbringung aller Festigkeitsnachweise
- Nutzung der vorhandenen Lasteinleitungs- und Befestigungsgegebenheiten

Zur Bildung des Simulationsmodells ist ein Startentwurf zu modellieren. Dieser wird aufgeteilt in veränderliche Optimierungsräume und unveränderliche, zumeist zur Lasteinleitung genutzten, Geometriebereiche. Für die Montage des Bauteils ist die Zugänglichkeit der Nieten zu gewährleisten. Aus der vorhandenen Baugruppe sind die unveränderlichen Geometrien sowie deren Positionen extrahiert worden. Das Ergebnis

ist intransparent in Abbildung 55a als Teil der MGB-Baugruppe dargestellt. Auf Basis dieser und dem zur Verfügung stehenden Bauraum erfolgt die Modellierung des Startentwurfs. Zur Berücksichtigung der Montagegegebenheiten erwies sich die Beachtung des notwendigen Freiraums für die Nieten direkt hinter den entsprechenden Bohrungen als ausreichend. Die Zuführung zu deren jeweiliger Position ist durch die Definition der Optimierungsrandbedingungen umgesetzt worden. Abbildung 55b zeigt die Drahtgitterdarstellung des Startentwurfs.

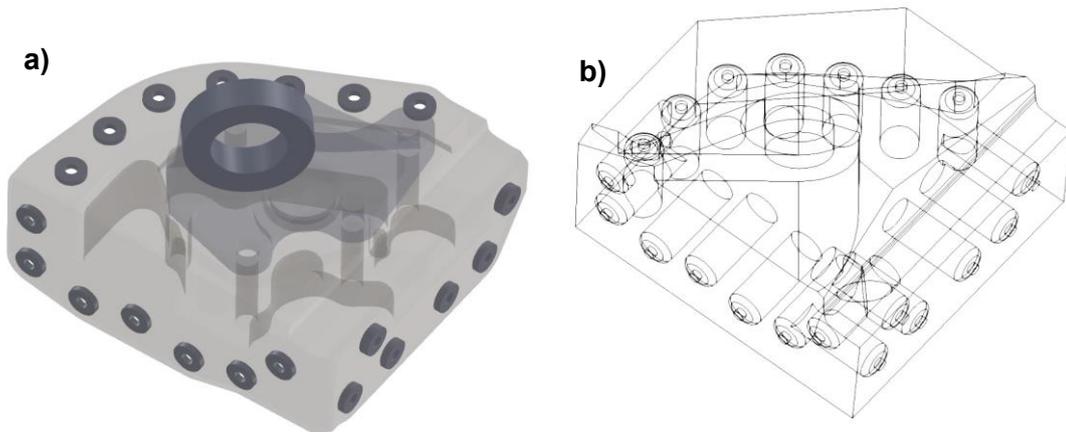


Abbildung 55 Darstellung a) der unveränderlichen, intransparenten Geometrien und b) des Drahtgittermodells des Startentwurfs der Optimierung

Zur Zuweisung der Simulations- und Optimierungseigenschaften sind die nachfolgend aufgeführten Parameter verwendet worden. Um eine effiziente Simulation zu erzielen, wurden ausschließlich die beiden größten Belastungen nach Abbildung 54 verwendet. Alle weiteren Nachweise waren Teil nachgelagerter Analysen.

- Netzeigenschaften
 - Das Erstellen erfolgt durch gleichmäßige, manuelle Vernetzung der unveränderlichen Geometrien sowie der freien, automatischen Vernetzung des Optimierungsraumes mit Tetraederelementen erster Ordnung.
 - Die Kantenlängen der Elemente betragen bei adaptiver Netzverfeinerung 0,8 mm bis 4 mm.
- Werkstoff Ti6Al4V
 - E-Modul: 120 GPa
 - Querkontraktionszahl: 0,3
 - Dichte: 4,43 g/cm³

- Belastungen und Einspannungen
 - Die Belastung des Lagerauges erfolgt durch einen zentralen Knoten. Dieser überträgt die Lasten über eindimensionale Elemente (Rigid Body Elements, RBE) auf die Elemente des Lagerauges. In Abhängigkeit der Struktursteifigkeit wird die zentrale Kraft auf die Knoten des Lagerauges interpoliert.
 - Die Einspannung erfolgt über Balkenersatzmodelle zur Abbildung der Niete und deren Kraftmessung. Diese sind an einem Ende über starre RBE mit den Knoten der Nietlöcher verbunden und am anderen vollständig eingespannt.
- Randbedingungen
 - Die auftretenden Spannungen der Elemente sollen < 1000 MPa im Falle der Crash Loads betragen.
 - Die Kraft pro Niet darf nicht größer als 18500 N sein.
 - Strukturen dürfen nicht kleiner als 5 mm sein. Dies dient der Berücksichtigung der Montagemöglichkeiten sowie Vermeidung von zu schmalen, lasttragenden Strukturen (vgl. Abschnitt 4.8.1).
 - Die maximale Strukturdicke ist zur Vermeidung spontan entstehender, großer Schmelzflächen auf 15 mm begrenzt worden.
 - Das zur Verfügung stehende Volumen beträgt 10 % des Startentwurfs.
- Zielfunktion
 - Minimierung der Nachgiebigkeit

Die Strukturoptimierung ist mit diesen Angaben erfolgreich durchgeführt worden, wenngleich kein Ergebnis mit allen erfüllten Randbedingungen erzielt werden konnte. Trotz der eingehaltenen Kräfte der Niete beträgt die Spannung maximal 1388 MPa. Als Resultat der Optimierung erfolgt die Darstellung der Elemente in Abhängigkeit der relativen Dichte. Als weiterführender Schritt ist eine erneute Analyse in Abhängigkeit eines ausgewählten Dichtewertes zielführend. Hierzu werden alle verbleibenden Elemente neu vernetzt und mit den zugewiesenen Eigenschaften erneut simuliert. Dies ist mitunter ausreichend, um Singularitäten der FEM zu beheben und so Spannungsspitzen zu reduzieren (Welsch 2015). Die Reanalyse zeigt maximale Spannungen von 1029 MPa. Dies wird als ausreichend gering erachtet, um das Ergebnis zu rekonstruieren.

Zur Rekonstruktion der diskreten Daten, die aufgrund der nachträglich einzustellenden Toleranzen notwendig ist, stehen die in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Möglichkeiten zur Verfügung. Zusätzlich sind die in Abschnitt 4 erarbeiteten, konstruktiven Grenzen des

EBM-Verfahrens zu berücksichtigen. Folgende DfAM-Einschränkungen existieren für die Rekonstruktion.

- Die minimale Strukturdicke lasttragender Elemente soll > 3 mm sein.
- Jede Funktionsfläche wird mit 2 mm beaufmaßt. Alle Nietlöcher werden geschlossen.
- Durch die einfache Supportstruktur sind keine Einschränkungen hinsichtlich deren Entfernung berücksichtigt worden.

Für die detailliertere Betrachtung der untersuchten Rekonstruktionsmethoden für die vorliegende technische Anwendungen sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Süß et al. 2017).

Zusammengefasst sind die jeweiligen Rekonstruktionen des Optimierungsergebnisses in Abbildung 56a bis c mit deren jeweiligem Speicherbedarf im neutralen Dateiformat sowie der Rekonstruktionsdauer dargestellt.

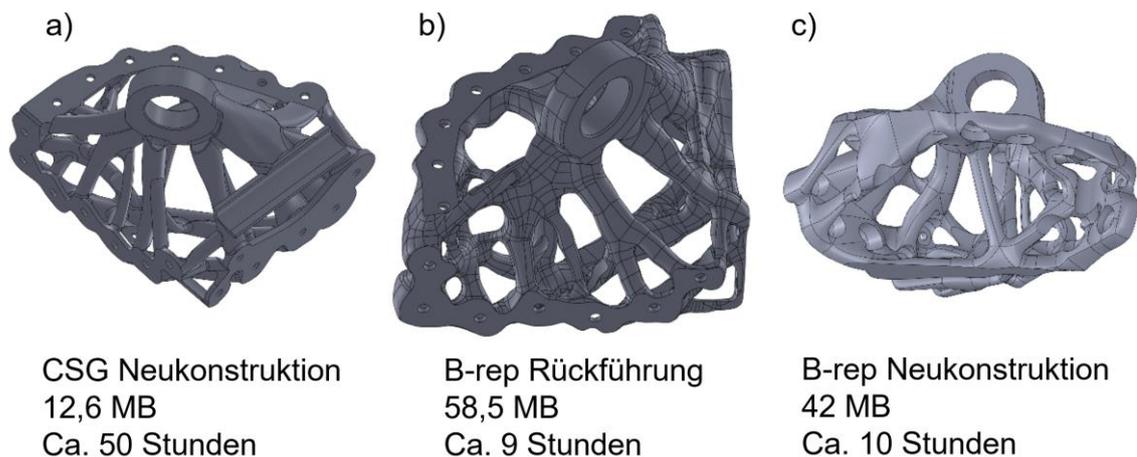


Abbildung 56 Ergebnisse der Rekonstruktionsmethoden a) CSG-Neukonstruktion, b) B-Rep-Rückführung und c) B-Rep-Neukonstruktion

5.1.3 Festigkeitsnachweise

Die Rekonstruktion ist einer erneuten Analyse zu unterziehen, um die Festigkeitsnachweise zu erbringen. Die Ergebnisse des Bauteils nach Abbildung 56a sind in Tabelle 10 verglichen mit den Resultaten der konventionellen Baugruppe und den Vorgaben der Auslegung dargestellt. Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen nachzuweisenden Belastungszustände ‚Important Part Check‘, ‚Retirement Time Calculation‘, ‚Flaw Tolerance Calculation‘ und ‚Fail-Safe Link‘ sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Süß 2015).

Tabelle 10 Festigkeitsnachweise des MGB

	Auslegungs- kriterium	Vorgabe	Konventionelle Baugruppe	EBM Ti6Al4V Optimierungs- ergebnis
Statische Belastung	Spannung unter Crash Loads	Maximal 1000 MPa	912 MPa	921 MPa
	Kräfte an den Nieten unter Ultimate Load	Maximal 18500 N	15461 N	18109 N
	Versagende Nieten unter Crash Loads	Anzahl überlasteter Nieten maximal 10 von 20	-	6 von 20
HCF	Important Part Check	Sicherheitsfaktor > 0	-0,18	0,49
	Retirement Time Calculation	Sicherheitsfaktor > 0	0,17	1,13
	Flaw Tolerance Calculation	Sicherheitsfaktor > 0	0,39	2,78
	Fail-Safe Link	Sicherheitsfaktor > 0	-0,21	1,83
LCF	Important Part Check	20000 Flugstunden	6600 Flugstunden	10200 Flugstunden
	Retirement Time Calculation	> 40000 Flugstunden	16000 Flugstunden	24000 Flugstunden
	Flaw Tolerance Calculation	> 3400 Flugstunden	1710 Flugstunden	10800 Flugstunden
	Fail-Safe Link	> 3400 Flugstunden	8620 Flugstunden	400000 Flugstunden
	Gewicht	< 2694 g	2694 g	1615 g (-40,06 %)

Bis auf die Retirement Time der LCF werden alle Auslegungsgrundlagen erfüllt. Verglichen mit dem konventionellen Entwurf resultieren höhere Sicherheitswerte und Flugstunden des Bauteils bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion. Die Optimierung ist somit zielführend.

Durch die Ergebnisse des konventionellen MGB und Präzisierung der Lastfälle ist die ursprüngliche Auslegung grundlegend geändert worden. Zusätzliche Nieten sowie notwendige konstruktive Elemente sind hinzugekommen. Die Methode der Strukturoptimierung führt dazu, dass das jeweilige Ergebnis nur für das spezifische abgebildete Modell ein Optimum erzeugt. Änderungen führen zu einem erneuten Prozessdurchlauf nach Abbildung 10, S. 37. Für die Betrachtung der erneuten additiven Auslegung des MGB, welche im Nachgang gefertigt worden ist, sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Süß et al. 2016b).

5.1.4 Fertigung

Die Analyse der Schmelzfläche des additiven MGB zeigt im Minimum ca. 1400 mm², wodurch der Überhangwinkel zur Erstellung der Supportstruktur mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 4.9.3.2 und Anlage A-19, S. 235 ff. auf $\leq 50^\circ$ festgelegt wurde. Zur automatischen Erzeugung sind Blocksupports innerhalb der Bauvorbereitungssoftware Materialise Magics Version 17 verwendet worden. Die Erkenntnisse und Anwendung aus Abschnitt 4.7 waren zum Zeitpunkt der Fertigung des MGB nicht nutzbar.

Zu Analyse Zwecken der unter Abschnitt 4.9.3.1 diskutierten Größenabweichung der A2X sind mit dieser Anlage zwei MGB jeweils ohne und mit Nachbearbeitungszugaben hergestellt worden. Bei ersterem wurde das CO_1 identisch zu den Ergebnissen aus Abschnitt 4 mit 0,31 festgelegt und bei zweiterem auf 0,18 geändert. Entsprechend der Beschreibung des CO_1 (vgl. Abbildung 8, S. 26) ist dadurch der Abstand zum CAD verringert worden, um negative Abweichungen der Strukturdicke zu vermeiden. Ferner sind bei dem MGB mit Nachbearbeitungsaufmaß die Skalierungsfaktoren aufgrund der Ergebnisse aus Abschnitt 4.1.1 angepasst und das Bauteil komplett auf Stützstrukturen und nicht auf der Bauplatte positioniert worden. Beide Bauteile wurden anschließend optisch analysiert. Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse des MGB links ohne und rechts mit Nachbearbeitungsaufmaß bei einer Farbskaleneinteilung von -0,5 mm bis +0,5 mm.

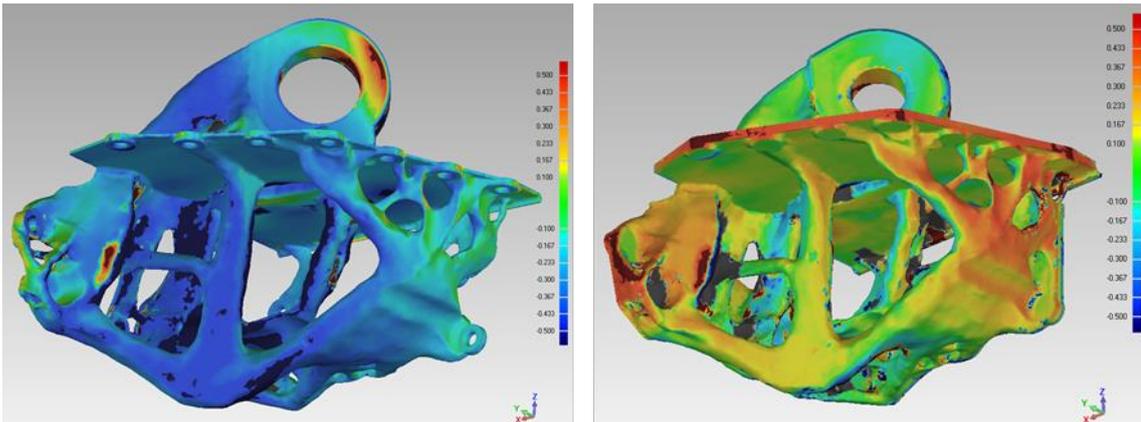


Abbildung 57 Darstellung der Messabweichungen bei $CO_1 = 0,31$ (links) und $0,18$ (rechts)

Die negativen Abweichungen von bis zu $-0,2$ mm pro Oberfläche zur Sollstruktur konnten auf $+0,2$ mm geändert werden. Örtliche Verformungen wie beispielsweise am Lagerauge ließen sich durch längere Supportstrukturen verringern.

Abschließend ist das Bauteil global durch den 3D SurFin[®] Prozess (vgl. Bagehorn et al. 2017) geglättet und dessen Funktionsflächen nachbearbeitet worden. Abbildung 58 stellt das finale MGB sowie den Aufbau am Prüfstand dar. Die Ergebnisse der Bauteilprüfung sind nicht Teil dieser Arbeit.

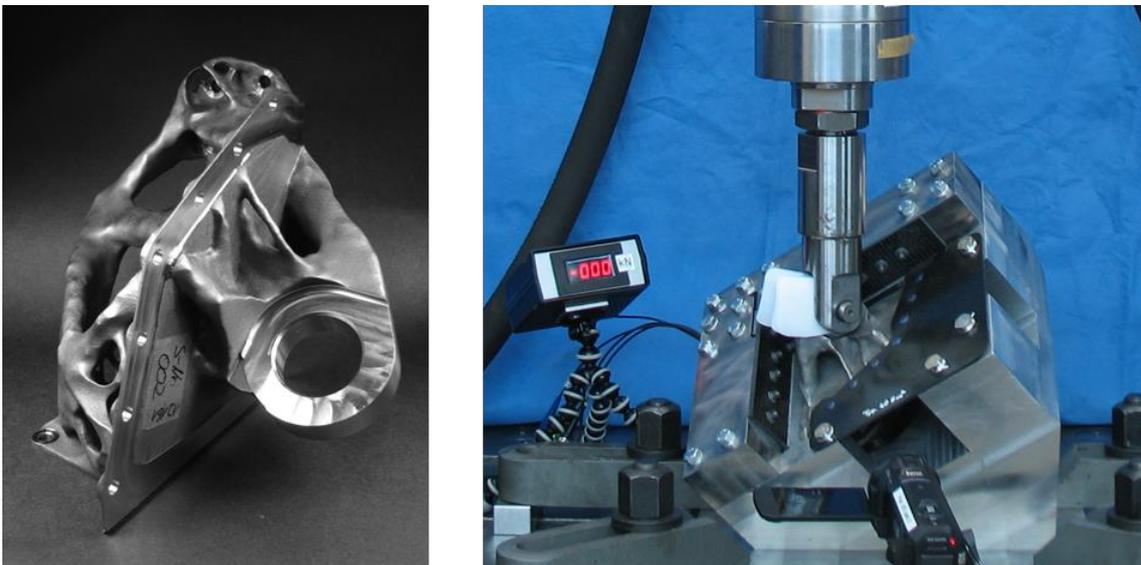


Abbildung 58 Darstellung des endbearbeiteten MGB (links) und der Einspannung auf dem Prüfstand (rechts)

5.2 Formula Student Lenkstockhalter (FSL)

In einem weiteren Anwendungsfall der Strukturoptimierung ist eine Baugruppe als Teil der Lenkinematik für den Motorsport weiterentwickelt worden. Ziel der Strukturoptimierung für EBM war die Konsolidierung des Lenkstockhalters, an welchem ein Winkelgetriebe zur Weiterleitung der Lenkbewegung angebracht ist. Zudem nimmt

diese Halterung alle Kräfte auf, die im Zuge der Fahrt vom Fahrer auf das Lenkrad aufgebracht und an das Monocoque weitergeleitet werden. Die entsprechenden Lastangriffspunkte des Lenkrades erzeugen translatorische Kräfte von jeweils ca. 500 N. Dies führt zu mehreren Lastfällen, welche im Zuge der Optimierung zu berücksichtigen sind. Neben der Gewichtsreduktion auf das Zielgewicht < 400 g ist eine hohe Steifigkeit des Bauteils Ziel der Strukturoptimierung, um direkte Rückmeldung der Lenkung ohne Verwindung des Halters zu ermöglichen. Konventionell besteht die Baugruppe mit 2 Fräs- sowie 2 Wasserstrahlteilen jeweils aus einer Aluminiumlegierung und inklusive aller Normteile aus insgesamt 16 Einzelteilen und ist in Abbildung 59a dargestellt. Das Gewicht der gesamten Baugruppe beträgt ca. 514 g. Die Lagerung der Lenkwelle, welche das Lenkrad mit dem Winkelgetriebe verbindet, erfolgt fluchtend, um Schäden der Einzelteile zu verhindern. Dementsprechend sind bestimmte Toleranzanforderungen zwischen dem Lagerauge und dem Eingang des Winkelgetriebes definiert.

Ansatz der Gestaltentwicklung und Strukturoptimierung bildet identisch zum MGB die Extraktion der Funktionsflächen entsprechend Abbildung 59b. Auf Basis dessen und den Anforderungen an den Bauraum wird das für die Optimierung zur Verfügung stehende Volumen modelliert. Dargestellt ist dies in Abbildung 59c. Vergleichbar zum MGB werden dadurch die Montagezugänglichkeiten der Befestigung des Bauteils und des Winkelgetriebes berücksichtigt.

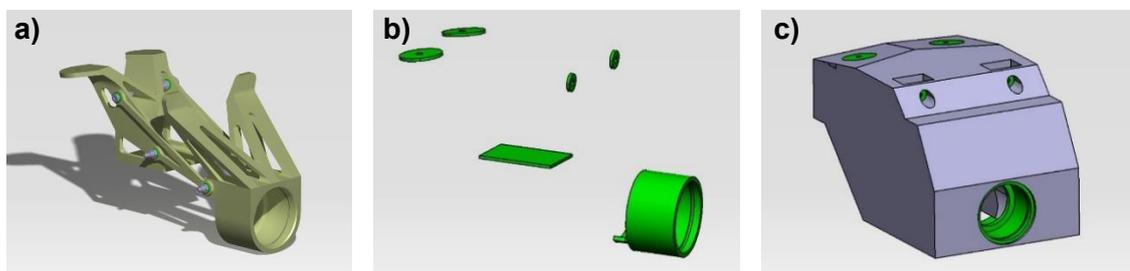


Abbildung 59 a) Konventionelle Konstruktion, b) unveränderlicher Designbereich und c) zur Verfügung stehendes, optimierbares Volumen des FSL

Ansatz der Entwicklung ist eine mehrstufige Strukturoptimierung innerhalb der auf dem Solver OptiStruct™ basierenden Software solidThinking® Inspire. Zur Erbringung des Zielgewichts mit Ti6Al4V muss ein Volumen $< 90,293$ cm³ erreicht werden. Das Startvolumen der Strukturoptimierung beträgt ca. 2600 cm³. Zur Erreichung des Gewichtsziels sind demnach ca. 3 % des Startvolumens zu erzeugen. Durch die Zerlegung des Ausgangsvolumens mithilfe derart kleiner FE steigt der Simulations- und Optimierungsaufwand. Infolgedessen wird eine mehrstufige Strukturoptimierung durchgeführt. Das im vorangegangenen Abschnitt durchgeführte Prinzip der Analyse des Ergebnisses mithilfe verfeinerter Vernetzung führt hierbei zum Startentwurf weiterer

Iterationen. Um für diese ausreichend veränderbares Volumen bereitzustellen, erfolgt für den ersten Durchlauf eine Restriktion des optimierbaren Volumens auf 20 %. Zielfunktion ist die Maximierung der Struktursteifigkeit, wobei die Verformung des Lagerauges maximal 0,1 mm betragen darf. Das daraus generierte Ergebnis, welches Abbildung 60b zeigt, wird im Anschluss neu vernetzt. Die definierten Lastfälle sowie die Zielfunktion der Minimierung der Nachgiebigkeit bei restringierter Lagerverschiebung bleiben erhalten. Das zur Optimierung nutzbare Volumen für die zweite Iteration beträgt 10 % des Zwischenergebnisses. Die Strukturdicken sind auf 5 mm bis 15 mm festgelegt worden. Das Resultat der Optimierung ist in Abbildung 60c dargestellt.

Die funktions- und montagegerechte Neukonstruktion des Ergebnisses der zweiten Iteration erfolgt mithilfe der B-rep. Das Ergebnis zeigt Abbildung 60d. Die Rekonstruktion erfüllt alle Festigkeitsnachweise. Die Steifigkeit des Bauteils ist im Vergleich zur initialen Baugruppe bei einer Gewichtsreduktion von 35 % um das 5-fache gestiegen. Zur DfAM-gerechten Gestaltung sind die Funktionsflächen für die spanende NC-Nachbearbeitung mit 1,5 mm beaufmaßt sowie die Nut des Lagersicherungsring geschlossen worden. Für die manuell durchzuführende Anpassung der Flächen an das Monocoque wurden 0,5 mm Materialzugabe berücksichtigt und die entsprechenden Bohrungen geschlossen. Aufgrund der filigranen Struktur des Ergebnisses ist davon auszugehen, dass bei der Nachbearbeitungen der Toleranzen Schwingungen und Verformungen an den jeweiligen Flächen auftreten (vgl. Alexander et al. 2016). Folglich sind Aufspanngeometrien für die NC-Nachbearbeitung in direkter Nähe zu den Funktionsflächen entsprechend Abbildung 60e hinzugefügt worden. Das mittels EBM hergestellte Bauteil ist gemäß der Baurichtung in Abbildung 60f dargestellt.

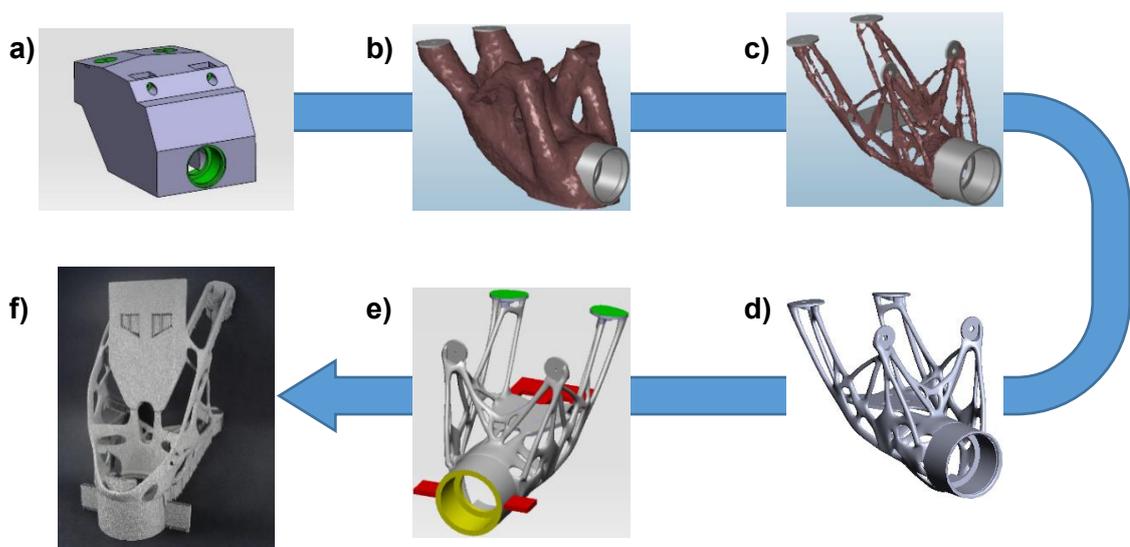


Abbildung 60 Verlauf der FSL-Strukturoptimierung vom a) Ausgangsmodell über die b) erste und c) zweite Optimierung sowie die d) Rekonstruktion und e) DfAM-Gestaltung zum f) mittels EBM hergestellten Bauteil

Der Anwendungsfall zeigt die Möglichkeiten der gestalterischen Beeinflussung der Strukturoptimierung. Durch die mehrstufige Optimierung lassen sich überflüssige Strukturbereiche detektieren, ohne eine feine Vernetzung und damit einen hohen Rechenaufwand zu verursachen. Durch den Ablauf der Strukturoptimierung bleiben initial definierte Werkstoff- und Belastungseigenschaften sowie Randbedingungen und Zielfunktion erhalten, um die erneute Analyse und Optimierung zu beschleunigen.

5.3 Flight Crew Rest Compartment Bracket (FCRC)

Das Flight Crew Rest Compartment Bracket (FCRC) ist Teil der Halterung einer Schlafkabine in Flugzeugen. Für dieses Bauteil erfolgte bereits eine Optimierung für die additive Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen (Kranz 2017). Die statische Prüfung des in der referenzierten Arbeit erzeugten additiven Bauteils zeigt allerdings, dass die realen Lasten das bis zu 4-fache der simulierten Werte erreichen können. Dies hat zur Folge, dass weiteres Optimierungspotenzial existiert. Zudem ist im Zuge der erneuten Bauteilauslegung die additive Fertigung mittels EBM und LBM zu berücksichtigen.

Aufgrund der unveränderten Belastungen wird zur Klärung der Abweichungen zwischen Bauteilsimulation und -test der FEM-Modellaufbau analysiert. Folgende Möglichkeiten sind identifiziert worden, welche zu den Abweichungen zwischen Simulation und Versuch führen.

- **Einspannung am Lagerauge**
Die Einspannung am Lagerauge ist über RBE ähnlich dem MGB realisiert. Entsprechend der Auslegung tritt unter anderem im Bereich des Lagerauges die höchste Kraft auf. Im Zuge der Analyse werden verschiedene Modellierungsarten der Lasteinleitung untersucht.
- **Befestigung des FCRC**
Die Bauteiltests zeigen höhere Verschiebungen als simuliert. Grund hierfür kann eine flexible Einspannung sein, welche in der Simulation als annähernd starr angegeben ist. Hierzu werden Schraubenersatzmodelle und die Grundplatte selbst in die Simulation einbezogen.

Die Einflüsse aufgrund der Definition der Zielvariablen auf das Optimierungsergebnis sind ebenfalls im Zuge der Weiterentwicklung untersucht worden. Zur detaillierten Beschreibung der Strukturoptimierung sei auf entsprechende Literatur verwiesen (Süß et al. 2018c). Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Tabelle 11.

Tabelle 11 Vergleich der Optimierungsziele und -ergebnisse des FCRC untereinander und in Bezug auf dessen Ursprungsdesign und -optimierung

						
Zieldefinition	Ausgangsbau teil	(nach Kranz 2017)	Steifigkeits-optimiert	Gewichts-optimiert mit Beachtung der Steifigkeit	Gewichts-optimiert	Gewichts-optimiert
Material	Al-Legierung	Ti6Al4V	Ti6Al4V	Ti6Al4V	Ti6Al4V	AlMgSc
Ver-schiebung	0,29 mm	0,26 mm (+11 %)	0,23 mm (+22 %)	0,3 mm (+4 %)	0,48 mm (-66 %)	0,4 mm (-38 %)
σ_{\max}	400 MPa	500 MPa	450 MPa	520 MPa	900 MPa	470 MPa
Masse	225 g	196 g (-13 %)	175 g (-22 %)	139 g (-38 %)	57 g (-75 %)	57 g (-75 %)

Zur Fertigung der Bauteile sind die Funktionsflächen beaufmaßt, die Aufbaurichtung verfahrensspezifisch angepasst sowie entsprechende Hilfsstrukturen zur Vermeidung von Stützstrukturen zwischen den Streben für das LBM hinzugefügt worden. Abbildung 61 stellt die hergestellten Bauteile dar. Die Bauteilprüfung zeigt trotz der Gewichtsreduktion von 75 % und der Auslegung an der Versagensgrenze des Materials eine Sicherheit von 2,2 beim EBM und 2,4 beim LBM.

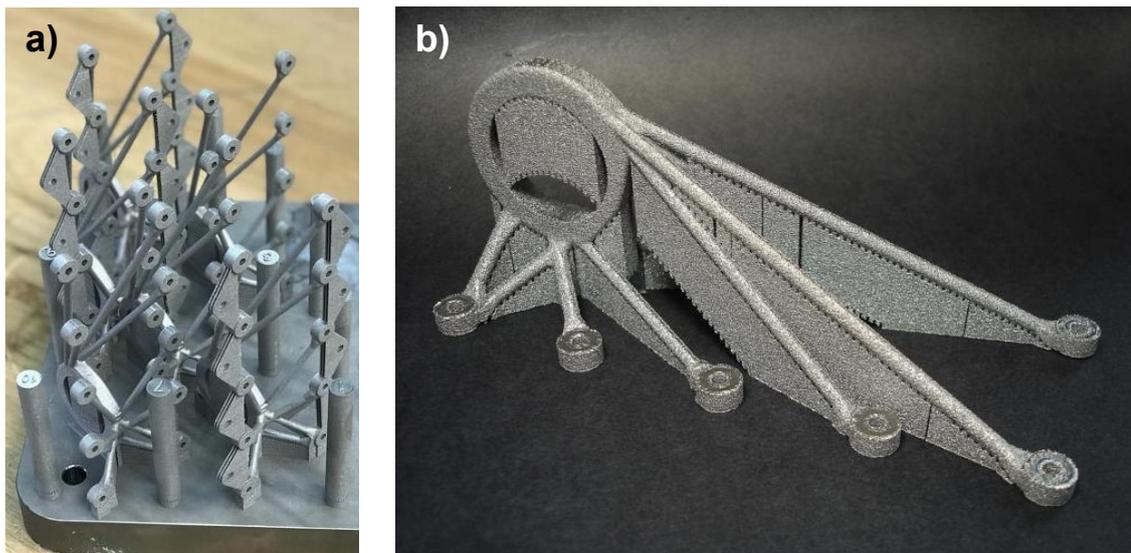


Abbildung 61 Darstellung des FCRC hergestellt mittels a) LBM und b) EBM

5.4 Zusammenfassung zur Strukturoptimierung

Mit der Kombination der Konstruktionsmethodik (vgl. Abbildung 9, S. 31) und des Strukturoptimierungsablaufs (vgl. Abbildung 10, S. 37) ist das Potenzial einer rechnergestützten Strukturoptimierung für das EBM in diesem Abschnitt nachgewiesen worden. Die Berücksichtigung von DfAM-Restriktionen wie beispielsweise überhangfreie Strukturen oder anisotropes Verhalten lässt sich im Zuge des Optimierungsprozesses für das EBM vernachlässigen. Für die Verbindung der zu optimierenden Anwendung zu weiteren Bauteilen oder Baugruppen ist die Möglichkeit der Montage zu berücksichtigen. Es erfolgt zudem die Beachtung des minimal belastbaren Strukturdurchmessers von 3 mm bei der Rekonstruktion des Optimierungsentwurfs.

Es wurden verschiedene Methoden untersucht, um die Optimierungsergebnisse effizient zu rekonstruieren. Die auf B-rep basierenden Modellierungswerkzeuge zeigen speziell für die topologieoptimierte Struktur eine hohe Effizienz. Für die Konstruktion technischer Bauteile mit tolerierten Geometrien, welche bei der EBM-Fertigung nachgelagert zu erzeugen sind, bleiben abschließende CSG-Methoden unumgänglich. Anders ist dies beispielsweise für medizinische Anwendungen umsetzbar (vgl. Süß et al. 2017).

Die vorliegenden Beispiele zeigen, dass durch die Verbindung der Strukturoptimierung mit der additiven Fertigung Gewichtseinsparungen im Bereich von 35 % bis 75 % erreichbar sind, wenngleich der Leichtbau bereits für die konventionell ausgelegten Konstruktionen branchenbezogen relevant erscheint. Die Betrachtung von Baugruppen gegenüber Bauteilen für einen potenziellen Anwendungsfall ist durch die Möglichkeiten der Bauteilkonsolidierung zu empfehlen.

5.5 Beispielhafte Umsetzung der Kostenabschätzung

Zur beispielhaften Darstellung der Kostenabschätzung entsprechend Abschnitt 3 werden die strukturoptimierten Bauteile genutzt. Für die drei Anwendungsszenarien erfolgt die Berechnung der Kosten für die Fertigung mittels Arcam A2X und Q20plus. Die Dimensionen der Bauteile, deren Volumen und Oberfläche werden aus der konventionellen Konstruktion jedes Bauteils extrahiert. Die abgeschätzten Volumina wurden nach Gleichung (3.1), S. 51 ermittelt und werden mit den optimierten Ergebnissen verglichen. Alle weiteren Faktoren und Kennzahlen zur Umsetzung der Berechnung lassen sich Tabelle 24 in Anlage A-12, S. 200 entnehmen.

Das Nachbearbeiten der Bauteile beinhaltet das Pulverstrahlen sowie die Entfernung der Supports, was jeweils manuell durchzuführende Arbeiten sind. Das Abtrennen der

Bauteile von der Bauplattform erzeugt keine Zusatzzeit und -kosten, da sich das Ti6Al4V nicht fest mit dieser verbindet. Weitere Kosten für maschinelle oder thermische Nachbearbeitung sowie Qualitätssicherung werden vernachlässigt.

In Tabelle 12 sind Kostenzusammensetzungen für die Fallbeispiele bei einer Fertigung mittels Arcam Q20plus dargestellt. Für die identischen Ergebnisse bei Nutzung einer Arcam A2X sei auf Tabelle 25 in Anlage A-12, S. 202 verwiesen.

Tabelle 12 Gesamtkosten für die Herstellung der Bauteile mit der Arcam Q20plus

Bauteile	MGB	FSL	FCRC
Initiales Volumen [mm ³]	373840,42 + 194899,14	183571,43	80714,28
Initiale Legierung	Ti6Al4V + 1.4545	EN AW 7075	EN AW 7075
Dimensionen Länge × Breite × Höhe [mm]	178 × 158 × 147	197 × 132,5 × 114,5	160,5 × 65 × 65,5
Geschätztes Volumen für Ti6Al4V nach Gleichung (3.1), S. 51 [mm ³]	373840,42 +178486,58 = 552327 (-3 %)	78645,87 (-57 %)	34579,7 (-57 %)
Anzahl N_{Ziel}	100	100	100
Max. Anzahl an Bauteilen pro Ebene $N_{Ebene,max}$	1	2	4
Max. Anzahl an Bauteilen pro Zyklus N_{max}	2	6	20
Anzahl notwendiger Bauzyklen	50	17	5
Gesamtzeit eines Bauzyklusses T_b	45,15 h	50,94 h	50,39 h
Gesamtzeit aller Bauzyklen	2257,62 h	850,34 h	251,96 h
Bauprozesskosten pro Zyklus K_{BP}	5001,49 €	5640,53 €	5579,94 €
Nachbearbeitungskosten pro Zyklus K_{SE}	30 €	90 €	300 €
Fertigungskostenanteil pro Zyklus K_F	5033,89 €	5737,58 €	5903,94 €
Materialkostenanteil pro Zyklus K_M	902,75 €	385,63 €	565,18 €
Bauteilkosten K	≈ 2968 €	≈ 1022 €	≈ 323 €
Optimiertes Volumen [mm ³]	344578,157 (-39 %)	80019,38 (-56 %)	15480 (-81 %)
Bauteilkosten K mit optimierten Volumen	≈ 2353 €	≈ 1023 €	≈ 267 €

Der Vergleich des Volumens der realen und geschätzten Änderung ist anwendbar und annähernd identisch beim FSL. Die Differenzen durch den Strukturleichtbau und

Materialwechsel führen bei den anderen Bauteilen zu Abweichungen, welche die Kosten beeinflussen. Die Volumenschätzung ist als konservativ zu werten, da keine zu hohe Gewichtsreduktion und folglich keine unrealistisch hohe Erwartung erzeugt wird.

Im Ergebnis zeigt sich, dass in Abhängigkeit der Bauteilanzahl, Bauteilgröße und des zu verarbeitenden Volumens eine Aussage zu den erwartenden Kosten getroffen werden kann, ohne die Konstruktion im Detail zu kennen. Dies erlaubt die frühzeitige, wirtschaftliche Bewertung des EBM-Verfahrens.

Die Füllung des gesamten Bauraums führt zu Gesamtzykluskosten zwischen 6000 € und 6500 €, unabhängig der Anzahl an Teilen und deren Grundgestalt. Eine Vereinfachung ist folglich möglich, welche allein die Bauteilkosten über die Grundmaße und der dadurch herstellbaren Anzahl an Bauteilen im Bauprozess erahnen lässt.

Durch die maximale Anzahl an Bauteilen pro Bauraum und deren Vielfache lassen sich die minimalen Bauteilkosten erreichen. Infolgedessen ist die Bauteilanzahl eine optimierbare Größe. Bauzyklen ohne vollständige Füllung führen zu erhöhten Kosten pro Bauteil. Dies ist exemplarisch in Abbildung 62 am Ergebnis des FSL dargestellt. Einzig die digitale Bauzyklusvorbereitung ist identisch, nicht erneut durchzuführen und mindert bei mehreren Bauzyklen die Kosten.

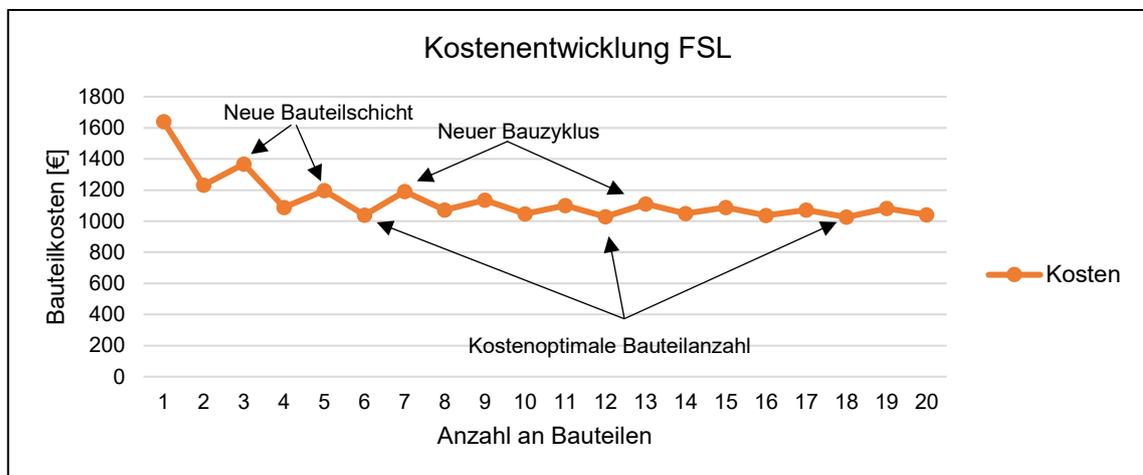


Abbildung 62 Kostenentwicklung des FSL in Abhängigkeit der Stückzahl

6 Zusammenfassung der Arbeit

Die elektronenstrahlbasierte additive Fertigung ermöglicht ein hohes Maß an Gestaltungsfreiheit. Durch die einzigartige Prozessführung lassen sich beanspruchungsgerechte Strukturen speziell in der Titanlegierung Ti6Al4V verzugsfrei, prozesseffizient und stützstrukturarm herstellen sowie der zur Verfügung stehende Bauraum komplett ausnutzen, was mit laseradditiven Verfahren eine Herausforderung darstellt. Im Hinblick auf die Konstruktion für das Elektronenstrahlschmelzen führt diese Prozessführung zu geometrischen Einschränkungen, welche im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen sind. Diese wurden bislang speziell für das EBM wenig erforscht.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die daraus resultierende Forschungslücke durch Anwendung methodischer Produktentwicklung, experimentell erarbeiteter Konstruktionsempfehlungen, simulationsgestützter Strukturoptimierung und prozesseffizienter Fertigung zu schließen. Konkret stand dabei die Titanlegierung Ti6Al4V im Fokus der Untersuchungen.

Im Zuge des Standes der Technik im Bereich der allgemeinen additiven und speziell der elektronenstrahlbasierten Fertigung sind die Grundlagen der methodischen Produktentwicklung, konstruktiven Bauteilgestaltung sowie Potenzial- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Abschnitt 2 dargestellt worden.

Entsprechend des Produktentwicklungsprozesses wurden in Abschnitt 3 die Strategien zur Beurteilung des Anwendungspotenzials und Abschätzung der mit der Herstellung verbundenen Kosten des EBM entwickelt. Ziel dieser Algorithmen ist deren Anwendbarkeit zum Zeitpunkt der Bewertung der allgemeinen Wirtschaftlichkeit innerhalb von Produktentwicklungsprozessen. Bis auf Zielgrößen sowie Entwurfsvariablen wie Gewicht und Begrenzungsraum liegt folglich keine fertigungsgerechte, konstruierte Gestalt vor. Auf Basis von Anwendungszielen und deren Wichtungsfaktoren werden mithilfe der Entwurfsgrößen Länge, Breite, Höhe, Zielgewicht, Funktionsoberfläche, Gesamtoberfläche und Werkstoffauswahl, die für EBM relevanten Verfahrenspotenziale ermittelt. Im Ergebnis erfolgt eine quantifizierte Bewertung, welche das Potenzial einer Fertigung mittels EBM widerspiegelt und bestimmte Handlungsempfehlungen in Aussicht stellt. Mithilfe der gewünschten Anzahl an Bauteilen, der ermittelten maximalen Menge an Bauteilen pro Zyklus und den mit dem Fertigungsprozess verbundenen Material-, Bauprozess-, Vorbereitungs- und

Nachbearbeitungskosten wird darauf aufbauend eine Abschätzung der Bauteilkosten durchgeführt.

Nach Festlegung des Geltungsbereichs der Gestaltungsrichtlinien hinsichtlich Material- und Prozessparameter bildet Abschnitt 4 mit der Beschreibung, Fertigung, Analyse und Auswertung der Geometriedemonstratoren den Kern der experimentellen Arbeit. Basierend darauf erfolgte die Zusammenstellung der Konstruktionsempfehlungen für EBM. Neben grundlegenden Abweichungen aufgrund der Position und Orientierung im Bauraum sind systematische Fehler von -0,05 mm bis -0,15 mm pro Oberfläche in der XY-Ebene anlagenspezifisch aufgedeckt worden. Zur Kompensation der Wärmeausdehnung existieren neben den linearen Skalierungsfaktoren weitere Abhängigkeiten. Die Position und Ausrichtung von Geometrieelementen sowie deren Strukturverlauf untereinander führen zu Maßabweichungen. Infolgedessen sind Aufmaße an Funktionsflächen im Bereich von 0,5 mm bis 3 mm in Abhängigkeit der Messlänge und Featureausrichtung untereinander zu empfehlen. Dies erlaubt die Einordnung nach DIN ISO 2768-1 in die Kategorie c (grob), nach DIN ISO 2768-2 in die Toleranzklasse L und nach ISO 286-1 in die Toleranzgrade IT12 bis IT15.

Im gleichen Abschnitt wurden minimale Geometrien von typischen Strukturelementen wie Wänden, Spalten, Zylindern und Bohrungen in Abhängigkeit des Orientierungswinkels untersucht. Durch die schichtweise Fertigung treten Formabweichungen auf, welche der Prozessführung zuzuschreiben sind. Folglich werden Strukturen, deren Breite geringer als ca. 0,6 mm parallel zur XY-Ebene ist, unabhängig der Konstruktion mit eben dieser Größe gefertigt. Je nach Ausrichtung der Geometrie führt dies an Kanten oder kleinen Rundungen zu Materialanhäufungen. Das Vorsintern des Pulvers schränkt die Gestaltungsfreiheit von subtraktiven Strukturen wie Bohrungen, Spalten und anderen Öffnungen sowie daraus resultierenden Kanälen ein. Die Entfernung des Pulvers ist bei kurzen, durchgängigen Öffnungen bis 0,8 mm Durchmesser möglich. Einseitig offene sowie tiefe Strukturen lassen sich bis zu einer Tiefe von 8 mm durch den üblichen Strahlprozess von Pulver befreien. Mit entsprechendem Werkzeug ist die Räumung längerer und einfach gekrümmter Kanalstrukturen mit einem Durchmesser > 5 mm durchführbar. Bei der Fertigung einer Schicht wird darunter befindliches Pulver beziehungsweise bereits verfestigtes Material erneut aufgeschmolzen. Bei der Generierung von Struktur direkt im angesinterten Pulver entstehen dadurch zusätzliche Materialanhaftungen an der Unterseite von bis zu 0,4 mm. Dies ist verstärkt bei der Belichtung von Bauteilkonturen aufgetreten, da der Energieeintrag anders als bei flächiger Belichtung nicht durch die Prozessführung gemindert wird. Die Überlagerung dieser Effekte und der minimal möglichen

Strukturbreite führt beispielsweise zu einer typischen umgekehrten Tropfenform bei Zylindern achsparallel zur XY-Ebene und zum Einfallen von identisch ausgerichteten Bohrungen sowie schmalen Bohrungsrändern. Ungeachtet dessen lassen sich Überhänge parallel zur XY-Ebene prozessstabil ohne Stützstruktur herstellen. Je nach Größe, Gestalt und darüberliegendem Material treten Formabweichungen auf, die durch konturfolgende Stützstrukturen nahezu vollständig vermieden werden können. Besteht ein Überhangwinkel an der Downskin-Fläche zwischen 0° und schmelzflächenabhängig ca. 50° sind Stützstrukturen für einen formtreuen Verlauf empfohlen. Mit ausreichend großer Belichtungsfläche und folglich hinreichender Wärmeabfuhrzeit lässt sich der kritische Überhangwinkel auf 35° reduzieren. Für die Gestalt des Supports bilden stiftartige Strukturen mit einem Abstand von ≤ 3 mm zueinander, einer Länge ≥ 10 mm und ohne Verbindung zu darunterliegender Bauteilstruktur einen zielführenden Kompromiss zwischen Formtreue, Oberflächenstrukturierung und Entfernbarekeit. Die Festigkeit schmaler Strukturen bleiben bis zu einem Querschnittsdurchmesser > 3 mm erhalten.

Im darauffolgenden Abschnitt 5 ist mithilfe simulativer Topologieoptimierung die Nutzung der Gestaltungsfreiheit zur Erzeugung von Leichtbaustrukturen und deren Herstellbarkeit mit EBM an Fallbeispielen nachgewiesen worden. Bei allen Anwendungsbeispielen ließen sich trotz der initialen Forderung nach Leichtbau zusätzliche Gewichtseinsparungen im Bereich von 35 % bis 75 % erzielen. Dabei wurden mehrere Methoden der Rückführung des Strukturoptimierungsergebnisses zu einer herstell- und endbearbeitbaren Gestalt untersucht. Wenngleich alle erprobten Möglichkeiten zielführend sein können, erwies sich die Neukonstruktion mittels B-Rep unter Zuhilfenahme des Optimierungsergebnisses mit abschließender boolescher Vereinigung von CSG-Geometrien als effizient. Ferner erlaubt diese Variante eine nachträgliche Änderung und erzeugt handhabbare Datengrößen.

Die Arbeit trägt mit den entwickelten Methoden und Richtlinien wesentlich zur Schließung der bislang vorhandenen, anwendungsrelevanten Lücke im Produktentwicklungsprozess für das additive Fertigungsverfahren Elektronenstrahlschmelzen bei. Kernaussagen der vorliegenden Arbeit sind maßgeblich in die Entwicklung der VDI-Richtlinie zu Gestaltungsempfehlungen für additive Fertigungsverfahren in Form der VDI 3405 Blatt 3.5 eingeflossen.

7 Ausblick

Die jeweiligen Untersuchungen sind weiter zu validieren und Ergebnisse gegebenenfalls anzupassen. Statistische Folgeuntersuchungen der Erprobungen im Zuge der Arbeit sollten durchgeführt werden, um Versuchsergebnisse zu vergleichen und Aussagen zu präzisieren.

Die in dieser Arbeit genutzten Methoden zur Erarbeitung der Richtlinien lassen sich auf weitere Materialien, Anlagen und Prozessparameter ausweiten. Die einzigartige Prozessführung des EBM erlaubt die Verarbeitung von Legierungen wie Titanaluminide, Reinkupfer und Werkzeugstählen, welche mit anderen additiven Verfahren nicht oder nur bedingt möglich sind. Deren Verarbeitbarkeit gilt es in Zukunft zu erforschen und ebenfalls in Form von Konstruktionsempfehlungen den Anwendern nutzbar zu machen.

Die Nachbearbeitung der mittels EBM generierten Bauteile ist zukünftig weiter zu untersuchen. Neben grundlegenden Erkenntnissen zur Prozessierbarkeit und Erweiterung der Legierungspalette mit entsprechenden Werkstoff- beziehungsweise Bauteileigenschaften sind die begrenzt erreichbaren Form- und Lagetoleranzen sowie Oberflächenrauheit entscheidende Hemmnisse für die Anwendung der Technologie. Durch den pulververarbeitenden Prozess lassen sich bislang ausschließlich Nachbearbeitungsverfahren zur Einstellung bestimmter Form- und Lagetoleranzen heranziehen. Deren effiziente Anwendung trägt zukünftig zur Etablierung des Verfahrens bei.

Aufgrund der Masse an Einflussparametern, die auf das Ergebnis von Bauprozessen einwirken, sind die Datenanalyse und das Datenmanagement entscheidende Kriterien bei entsprechenden Entwicklungsarbeiten. Intelligente Datenverarbeitungsalgorithmen gilt es zu installieren, um die Eingabe, Auswertung, Verarbeitung und Erkenntnisgewinnung aufgrund der enormen Datenmenge zu überblicken. Selbstlernende Algorithmen und künstliche Intelligenz gewinnen zunehmend an Relevanz, um die komplexen und teilweise nicht nachvollziehbaren physikalischen, werkstoff- und anlagensteuerungstechnischen Wirkmechanismen zu verarbeiten. Wenngleich Kamera- und Sensortechnik in den Anlagen integriert sind, wird deren effiziente Auswertung für den weiteren Erkenntnisgewinn relevant werden.

8 Literaturverzeichnis

Abdeen, D. H.; Palmer, B. R. (2016): Corrosion evaluation of Ti-6Al-4V parts produced with electron beam melting machine. In: *Rapid Prototyping Journal* 22 (2). DOI: 10.1108/RPJ-09-2014-0104.

Ackelid, U. (2010): Improved Surface Quality and Productivity in Ti Additive Manufacturing using EBM MultiBeam. Titanium. Arcam AB. Orlando, Florida, Oktober 2010. Online verfügbar unter http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/Ackelid_Ulf_2010_MedicalAppli.pdf, zuletzt geprüft am 08.02.2016.

Ackelid, U.; Bahbou, F. (2016): Improved Parameters for Hot Isostatic Pressing of Ti 6Al 4V manufactured by EBM. Arcam User Group Meeting. Schweden, 2016.

Adam, G. A. O.; Zimmer, D. (2014): Design for Additive Manufacturing - Element transitions and aggregated structures. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7 (1), S. 20–28. DOI: 10.1016/j.cirpj.2013.10.001.

Adam, G. A. O.; Zimmer, D. (2015): On design for additive manufacturing: evaluating geometrical limitations. In: *Rapid Prototyping Journal* 21 (6), S. 662–670. DOI: 10.1108/RPJ-06-2013-0060.

DIN EN ISO/ASTM 52900, Juni 2017: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie, zuletzt geprüft am 25.07.2015.

DIN EN ISO 52911-1, Dezember 2017: Additive Fertigung – Technische Konstruktionsrichtlinie für Pulverbettfusion – Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen (ISO/ASTM DIS 52911-1:2017); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO/ASTM 52911-1:2017, zuletzt geprüft am 17.11.2017.

DIN EN ISO ASTM 52902, Juni 2018: Additive Fertigung – Testkörper – Allgemeine Leitlinie für die Bewertung der geometrischen Leistung additiver Fertigungssysteme (AM-Systeme), zuletzt geprüft am 29.05.2018.

VDI 3405-3, Februar 2015: Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen.

VDI 3405-3.5, September 2018: Additive Fertigungsverfahren Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Elektronen-Strahlschmelzen, zuletzt geprüft am 31.10.2018.

- Al-Bermami, S. S. (2011): An Investigation into Microstructure and Microstructural Control of Additive Layer Manufactured Ti-6Al-4V by Electron Beam Melting. PhD. The University of Sheffield, Sheffield, England. Department of Engineering Materials. Online verfügbar unter <http://etheses.whiterose.ac.uk/14694/1/555712.pdf>, zuletzt geprüft am 07.02.2018.
- Alexander, I.; Vladimir, G.; Petr, P.; Mihail, K.; Yuriy, I.; Andrey, V. (2016): Machining of Thin-walled Parts Produced by Additive Manufacturing Technologies. In: *Procedia CIRP* 41, S. 1023–1026. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.088.
- Ameen, W.; Al-Ahmari, A.; Mohammed, M.; Mian, S. (2018a): Manufacturability of Overhanging Holes Using Electron Beam Melting. In: *Metals* 8 (6), S. 397. DOI: 10.3390/met8060397.
- Ameen, W.; Al-Ahmari, A.; Mohammed, M. K.; Abdulhameed, O.; Umer, U.; Moiduddin, K. (2018b): Design, finite element analysis (FEA), and fabrication of custom titanium alloy cranial implant using electron beam melting additive manufacturing. In: *Adv produc engineer manag* 13 (3), S. 267–278. DOI: 10.14743/apem2018.3.289.
- Arcam AB: Arcam A2X - Setting the standard for Additive Manufacturing. Hg. v. Arcam AB. Arcam AB. Online verfügbar unter <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcam-a2x.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2018.
- Arcam AB: Ti-6Al-4V Datenblatt. Online verfügbar unter <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>, zuletzt geprüft am 11.12.2018.
- Arcam EBM (Hg.): Welcome to manufacturing unbound. Online verfügbar unter <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf>, zuletzt geprüft am 08.04.2018.
- Attar, E. (2011): Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes. Dissertation. Universität Nürnberg-Erlangen, Erlangen. technische Fakultät. Online verfügbar unter <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/year/2011/docId/1770>, zuletzt geprüft am 08.02.2016.
- Badiru, A. B.; Valencia, V. V.; Liu, D. (2017): Additive manufacturing handbook. Product development for the Defense industry. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group (Systems innovation series).
- Bagehorn, S.; Mertens, T.; Seack, O.; Maier, H. J. (2016): Reduzierung der Oberflächenrauigkeit additiv gefertigter metallischer Komponenten mit Hilfe des erweiterten Elektropolierens. Reduction of the surface roughness of additively manufactured metallic parts by enhanced electrolytic smoothing. In: W. Kniffka, M.

- Eichmann und G. Witt (Hg.): Rapid.Tech - International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 14 - 16 June 2016. 13th. München: Carl Hanser Verlag (Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany), S. 61–70.
- Bagehorn, S.; Wehr, J.; Maier, H. J. (2017): Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. In: *International Journal of Fatigue* 102, S. 135–142. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.05.008.
- Baumers, M. (2012): Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. Doctoral Thesis. Loughborough University, Loughborough. Online verfügbar unter <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/10768>, zuletzt geprüft am 31.07.2018.
- Baumers, M.; Tuck, C.; Wildman, R.; Ashcroft, I.; Hague, R. (2016): Shape Complexity and Process Energy Consumption in Electron Beam Melting: A Case of Something for Nothing in Additive Manufacturing? In: *Journal of Industrial Ecology*. DOI: 10.1111/jiec.12397.
- Beiss, P. (2013): Pulvermetallurgische Fertigungstechnik. 2. Aufl. s.l.: Springer-Verlag. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-32032-3.pdf>, zuletzt geprüft am 28.06.2018.
- Bendsøe, M. P.; Sigmund, O. (2004): Topology optimization. Theory, methods, and applications. 2. ed., corr. printing. Berlin: Springer (Engineering online library).
- Bourell, D. L.; Rosen, D. W.; Leu, M. C. (2014): The Roadmap for Additive Manufacturing and Its Impact. Laboratory for Freeform Fabrication, Advanced Manufacturing Center, University of Texas. Austin, TX, zuletzt geprüft am 21.04.2015.
- Brackett, D.; Ashcroft, I.; Hague, R. (2011): Topology Optimization for Additive Manufacturing (Solid Freeform Fabrication Symposium). Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-27-Brackett.pdf>, zuletzt geprüft am 01.02.2018.
- Braian, M.; Jönsson, D.; Kevci, M.; Wennerberg, A. (2018): Geometrical accuracy of metallic objects produced with additive or subtractive manufacturing. A comparative in vitro study. In: *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*. DOI: 10.1016/j.dental.2018.03.009.
- Byers, K. J.; Barr, C. (2018): Metal Additive Manufactured Freeform Antenna. In: *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, S. 1. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2866561.

- Cheng, B.; Chou, Y. K. (2017): Overhang Support Structure Design for Electron Beam Additive Manufacturing. Mechanical Engineering Department, University of Alabama. Tuscaloosa, AL 35487, USA, zuletzt geprüft am 28.07.2017.
- Cheng, L.; Liu, J.; Liang, X.; To, A. C. (2018): Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. DOI: 10.1016/j.cma.2017.12.024.
- Chou, Y.-S.; Cooper, K. (2015): Systems and methods for designing and fabricating support structures for overhang geometries of parts in additive manufacturing. Angemeldet durch The Board of Trustees of The University of Alabama am 13.11.2015. Anmeldenr: 14/940,564. Veröffentlichungsnr: US 2017/0136539 A1.
- Ciobota, N.-D. (2012): STANDARD TESSELLATION LANGUAGE IN RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY. In: *The Scientific Bulletin of VALAHIA University – MATERIALS and MECHANICS – Nr. 7 10 (7)*, S. 81–85. Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/3692/0f47245d82b9fbd5d6424d7e40a0131757e8.pdf>, zuletzt geprüft am 07.07.2019.
- Cronskär, M.; Bäckström, M.; Rännar, L.-E. (2013): Production of customized hip stem prostheses – a comparison between conventional machining and electron beam melting (EBM). In: *Rapid Prototyping Journal* 19 (5), S. 365–372. DOI: 10.1108/RPJ-07-2011-0067.
- Cunningham, R.; Narra, S. P.; Ozturk, T.; Beuth, J.; Rollett, A. D. (2016): Evaluating the Effect of Processing Parameters on Porosity in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V via Synchrotron X-ray Microtomography. In: *JOM* 68 (3), S. 765–771. DOI: 10.1007/s11837-015-1802-0.
- Danjou, S.; Köhler, P. (2010): Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RP-Kette. In: *RTejournal - Forum für Rapid Technologie* 6 (1). Online verfügbar unter <https://www.rtejournal.de/ausgabe6/2210/ArtikelPDF.pdf>, zuletzt geprüft am 12.02.2016.
- DAT (2016): Additive Fertigung. Stellungnahme. 1. Auflage. Halle (Saale), München, Mainz: Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. Online verfügbar unter

https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2016_Stellungnahme_AdditiveFertigung.pdf, zuletzt geprüft am 19.03.2018.

Dehoff, R. R.; Hummelt, E.; Solovyeva (2016): Feasibility and Testing of Additive Manufactured Components. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Oak Ridge, Tennessee. Online verfügbar unter <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub69614.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2018.

Delfs, P.; Töws, M.; Schmid, H.-J. (2016): Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time. In: *Additive Manufacturing*. DOI: 10.1016/j.addma.2016.06.003.

Dolimont, A.; Michotte, S.; Lorphèvre, E. R.; Ducobu, F.; Formanoir, C. de; Godet, S.; Filippi, E. (2015): Characterisation of electron beam melting process on Ti6Al4V in order to guide finishing operation. In: *IJRAPIDM* 5 (3/4), S. 320. DOI: 10.1504/IJRAPIDM.2015.074811.

Dolimont, A.; Michotte, S.; Lorphèvre, E. R.; Ducobu, F.; Formanoir, C. de; Godet, S.; Filippi, E. (Hg.) (2016): ESAFORM 2016: Proceedings of the 19th International ESAFORM Conference on Material Forming. Effect of HIPping (Hot Isostatic Pressing) on electron beam melting Ti6Al4V parts after machining. Nantes, France, 27–29 April 2016: Author(s) (AIP Conference Proceedings). Online verfügbar unter <http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/aip/proceeding/aipcp/1769/10.1063/1.4963616/1.4963616.pdf?expires=1477656044&id=id&accname=guest&checksum=0719DC00AF656CE0B90B566532765C19>.

Donachie, M. J. (2010): Titanium. A technical guide. 2nd ed., digital printing. Materials Park, Ohio: ASM International.

Dowland, K. A. (1985): Determining an upper bound for a class of rectangular packing problems. In: *Computers & Operations Research* 12 (2), S. 201–205. DOI: 10.1016/0305-0548(85)90044-9.

Drescher, P.; Sarhan, M.; Seitz, H. (2016): An Investigation of Sintering Parameters on Titanium Powder for Electron Beam Melting Processing Optimization. In: *Materials* 9 (12), S. 974. DOI: 10.3390/ma9120974.

Edlund, P. (2017): Additive Manufacturing in Low-volume Production. Business Case for Metal Components. Master Thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Department of Industrial and Material Science. Online verfügbar

unter <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/251245/251245.pdf>, zuletzt geprüft am 31.08.2017.

Edwards, P.; O'Conner, A.; Ramulu, M. (2013): Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components. Properties and Performance. In: *J. Manuf. Sci. Eng* 135 (6), S. 61016. DOI: 10.1115/1.4025773.

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M. (2014): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-41959-1>.

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446436275>.

Everhart, W.; Sawyer, E.; Neidt, T.; Dinardo, J.; Brown, B. (2016): The effect of surface finish on tensile behavior of additively manufactured tensile bars. In: *J Mater Sci* 51 (8), S. 3836–3845. DOI: 10.1007/s10853-015-9702-9.

Farin, G. E. (1994): Kurven und Flächen im Computer Aided Geometric Design: eine praktische Einführung. 2. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg. Online verfügbar unter <https://katalogbeta.slub-dresden.de/id/0001699862/#detail>.

Faskhutdinov, R. N.; Dubrovskaya, A. S.; Dongauzer, K. A.; Maksimov, P. V.; Trufanov, N. A. (2017): Topology optimization of a gas-turbine engine part. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 177, S. 12077. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012077.

Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8., vollst. überarb. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher).

Feldmann, C.; Pumpe, A. (2016): 3D-Druck -- Verfahrensauswahl und Wirtschaftlichkeit: Entscheidungsunterstützung für Unternehmen (Essentials (Springer VS)).

Fiaz, H. S. (2016): Metal additive manufacturing for microelectromechanical systems: Titanium alloy (Ti-6Al-4V)-based nanopositioning flexure fabricated by electron beam melting. In: *Sens. Actuators A: Phys.*

Finzel, T. (2016): Abbildungsgenauigkeit beim selektiven Elektronenstrahlschmelzen. Masterarbeit. Friedrich-Alexander Universität Erlangen/Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Technologie der Metalle,

- Formanoir, C. de; Michotte, S.; Rigo, O.; Germain, L.; Godet, S. (2016): Electron beam melted Ti–6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material. In: *Materials Science and Engineering: A* 652, S. 105–119. DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.052.
- Fousová, M.; Vojtěch, D.; Doubrava, K.; Daniel, M.; Lin, C.-F. (2018): Influence of Inherent Surface and Internal Defects on Mechanical Properties of Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy. Comparison between Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. In: *Materials* 11 (4), S. 537. DOI: 10.3390/ma11040537.
- Frazier, W. E. (2014): Metal Additive Manufacturing. A Review. In: *J. of Materi Eng and Perform* 23 (6), S. 1917–1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z.
- Fu, M.-H.; Zheng, B.-B.; Li, W.-H. (2017): A novel chiral three-dimensional material with negative Poisson's ratio and the equivalent elastic parameters. In: *Composite Structures* 176, S. 442–448. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.05.027.
- Galarraga, H.; Lados, D. A.; Dehoff, R. R.; Kirka, M. M.; Nandwana, P. (2016): Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). In: *Additive Manufacturing*. DOI: 10.1016/j.addma.2016.02.003.
- Galarraga, H.; Warren, R. J.; Lados, D. A.; Dehoff, R. R.; Kirka, M. M. (2017a): Fatigue crack growth mechanisms at the microstructure scale in as-fabricated and heat treated Ti–6Al–4V ELI manufactured by electron beam melting (EBM). In: *Engineering Fracture Mechanics*. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.03.024.
- Galarraga, H.; Warren, R. J.; Lados, D. A.; Dehoff, R. R.; Kirka, M. M.; Nandwana, P. (2017b): Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). In: *Materials Science and Engineering: A*. DOI: 10.1016/j.msea.2017.01.019.
- Garaigordobil, A.; Ansola, R.; Santamaría, J.; Fernández de Bustos, I. (2018): A new overhang constraint for topology optimization of self-supporting structures in additive manufacturing. In: *Struct Multidisc Optim* 194 (1), S. 363. DOI: 10.1007/s00158-018-2010-7.
- Gaynor, A. T.; Guest, J. K. (2016): Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design. In: *Struct Multidisc Optim*. DOI: 10.1007/s00158-016-1551-x.
- Gebhardt, A. (2016): Additive Manufacturing. 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage.

DIN 4760, Juni 1982: Gestaltabweichungen; Begriffe; Ordnungssystem.

Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. (2014): Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. New York: Springer New York. Online verfügbar unter <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4939-2113-3>, zuletzt geprüft am 27.09.2015.

Girdwood, R. D. (2017): Developing a Framework to Investigate the Resource Efficiency of Manufactured Titanium Components Process Chains. Masterarbeit. Stellenbosch University, Stellenbosch. Faculty of Engineering. Online verfügbar unter https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwjspq-88JfVAhVCaIAKHd9RDEwQFgg0MAE&url=http%3A%2F%2Fscholar.sun.ac.za%2Fbitstream%2Fhandle%2F10019.1%2F101024%2Fgirwood_developing_2017.pdf%3Fsequence%3D1&usg=AFQjCNFEwPZNeJi8EJmeEPa5KY-86vZJiQ&cad=rja, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

Gong, H. (2013): Generation and detection of defects in metallic parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting and their effects on mechanical properties. Dissertation. University of Louisville, Louisville. Online verfügbar unter <http://ir.library.louisville.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1514&context=etd>, zuletzt geprüft am 17.02.2016.

Grandvallet, C.; Maisonneuve, J.; Vignat, F. (2018): A method and rules to design supports for EBM parts. In: *Procedia CIRP* 72, S. 1178–1183. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.159.

Grund, M. (2015): Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren. Mit Fallbeispielen aus der Luftfahrtindustrie und Medizintechnik / Maike Grund (Light Engineering für die Praxis). Online verfügbar unter <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-662-44266-1>, zuletzt geprüft am 24.01.2018.

DIN 17865, 1990: Gussstücke aus Titan und Titanlegierungen; Feinguss; Kompaktguss.

Hartogh, P.; Vietor, T. (2018): Vorhersage der Fertigungszeit und -kosten für die additive Serienfertigung. In: R. Lachmayer, R. B. Lippert und S. Kaieler (Hg.): Additive Serienfertigung. Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung. 1. Auflage 2018. Berlin: Springer Berlin, S. 70–86.

- Harun, W. S. W.; Kamariah, M. S. I. N.; Muhamad, N.; Ghani, S. A. C.; Ahmad, F.; Mohamed, Z. (2017): A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials. In: *Powder Technology*. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.12.058.
- Harzheim, L. (2008): *Strukturoptimierung. Grundlagen und Anwendungen*. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch.
- Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E.; Emmelmann, C. (2016): Additive manufacturing of metals. In: *Acta Materialia*. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- Hiersig, H. M. (1995): *VDI-Lexikon Maschinenbau*. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-57850-2>.
- Hoffmann, C. M. (1993): *Geometric and solid modeling. An introduction*. 2nd. print. San Mateo, Calif.: MORGAN KAUFMANN (Morgan Kaufmann series in computer graphics and geometric modeling).
- Hofmann, D.; Schöne, C.; Stelzer, R. (2015): Anwendung optischer und volumetomographischer Aufnahmeverfahren zur Analyse und Auswertung generativ gefertigter Bauteile am Beispiel metallpulverbasierter Verfahren. In: K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, N. Müller, R. Frank und R. Stelzer (Hg.): *Produktentwicklung zur Qualitätssicherung. Tagungsband ; 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2015 ; 8. und 9. Oktober in Clausthal ; [KT 2015]*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Univ., Fak. für Maschinenbau.
- Hossain, M. S.; Gonzalez, J. A.; Hernandez, R. M.; Shuvo, M. A. I.; Mireles, J.; Choudhuri, A. et al. (2016): Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology. In: *Additive Manufacturing*. DOI: 10.1016/j.addma.2016.01.001.
- Hossain, M. S.; Mireles, J.; Morton, P.; Lin, Y.; Terrazas, C. A.; Wicker, R. B. (2018): Part re-registration during process interruption of electron beam melting additive manufacturing. In: *Int J Adv Manuf Technol* 10 (1–4), S. 58. DOI: 10.1007/s00170-017-1553-x.
- Hrabe, N.; Gnäupel-Herold, T.; Quinn, T. (2017): Fatigue properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM). Effects of internal defects and residual stress. In: *International Journal of Fatigue* 94, S. 202–210. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.04.022.
- Hrabe, N.; Quinn, T. (2013a): Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting

- (EBM), Part 1: Distance from build plate and part size. In: *Materials Science and Engineering: A* 573, S. 264–270. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.064.
- Hrabe, N.; Quinn, T. (2013b): Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location. In: *Materials Science and Engineering: A* 573, S. 271–277. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.065.
- Huang, R.; Riddle, M.; Graziano, D.; Warren, J.; Das, S.; Nimbalkar, S. et al. (2016): Energy and emissions saving potential of additive manufacturing. The case of lightweight aircraft components. In: *Journal of Cleaner Production* 135, S. 1559–1570. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109.
- Jurisch, M.; Süß, M.; Kirchner, A.; Kluge, P.; Klöden, B.; Weißgärber, T.; Kieback, B. (2018): Selective Electron Beam Melting of Tool Steels – Dimensional Limitations. In: Euro PM2018 proceedings. 14-18 October 2018, Bilbao Exhibition Centre (BEC), Bilbao, Spain. Shrewsbury, United Kingdom: European Powder Metallurgy Association (EMPA).
- Kahlin, M.; Ansell, H.; Moverare, J. J. (2017): Fatigue behaviour of notched additive manufactured Ti6Al4V with as-built surfaces. In: *International Journal of Fatigue*. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.04.009.
- Kahnert, M. (2014): Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM). Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1171971/1171971.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2016.
- Karlsson, J. (2015): Optimization of Electron Beam Melting for Production of Small Components in Biocompatible Titanium Grades. Dissertation. Uppsala University, Uppsala, Schweden. Faculty of Science and Technology. Online verfügbar unter <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:765202/FULLTEXT01.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2016.
- Karlsson Algardh, J.; Horn, T.; West, H.; Aman, R.; Snis, A.; Engqvist, H. et al. (2016): Thickness dependency of mechanical properties for thin-walled titanium parts manufactured by Electron Beam Melting (EBM)®. In: *Additive Manufacturing* (12), S. 45–50. DOI: 10.1016/j.addma.2016.06.009.
- Khodaygan, S.; Golmohammadi, A. H. (2017): Multi-criteria optimization of the part build orientation (PBO) through a combined meta-modeling/NSGAII/TOPSIS method

for additive manufacturing processes. In: *Int J Interact Des Manuf* 89 (2), S. 191. DOI: 10.1007/s12008-017-0443-7.

Kirchner, A.; Klöden, B.; Luft, J.; Weißgärber, T.; Kieback, B. (2014): Process Window for Electron Beam Melting of Ti-6Al-4V. Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Manufacturing (Euro PM - AM: Technologies). Online verfügbar unter http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/dd/Publikationen/2014/Euro_PM_2014_Kirchner_Process_Window_for_Electron_Beam_Melting_of_Ti-6Al-4V_EPMA.pdf, zuletzt geprüft am 16.02.2015.

Klein, B. (2013): Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 10., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02272-3>.

Kok, Y.; Tan, X.; Loh, N. H.; Tor, S. (2016): Geometrical-based characterisation of complex ti-6al-4v parts fabricated by selective electron beam melting. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016)*, S. 385–390. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10220/41816>, zuletzt geprüft am 03.01.2017.

VDI 2222-2, Februar 1982: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.

VDI 2222-1, Juni 1997: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.

Körner, C. (2016): Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. In: *International Materials Reviews*, S. 1–17. DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289.

Körner, C.; Bauereiß, A.; Attar, E. (2013): Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders. In: *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 21 (8), S. 85011. DOI: 10.1088/0965-0393/21/8/085011.

Kranz, J. (2017): Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C. (2015): Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. In: *J. Laser Appl.* 27 (S1), S14001. DOI: 10.2351/1.4885235.

Kretzschmar, N.; Ituarte, I. F.; Partanen, J. (2018): A decision support system for the validation of metal powder bed-based additive manufacturing applications. In: *Int J Adv Manuf Technol* 5 (3/4), S. 232. DOI: 10.1007/s00170-018-1676-8.

Krol, T. A.; Seidel, C.; Schilp, J.; Hofmann, M.; Gan, W.; Zaeh, M. F. (2013): Verification of Structural Simulation Results of Metal-based Additive Manufacturing by Means of Neutron Diffraction. In: *Physics Procedia* 41, S. 849–857. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.158.

Krol, T. A.; Zaeh M. F.; Seidel, C. (2012): Optimization of supports in metal-based additive manufacturing by means of finite element method. Institute for Machine Tools and Industrial Management (iwb), Technische Universität München,. Online verfügbar unter https://pdfs.semanticscholar.org/679a/49ecd1727c2d3331e5e148d2401fd11715f8.pdf?_ga=2.56319331.950558049.1500539164-1588702986.1500539164, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 20.07.2017.

Kumar, V.; Dutta, D. (1997): An assessment of data formats for layered manufacturing. In: *Advances in Engineering Software* 28 (3), S. 151–164. DOI: 10.1016/S0965-9978(96)00050-6.

Kumke, M. (2018): Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Wiesbaden: Springer Science and Business Media; Springer.

Künneke, T.; Bürcker S.; Lieneke T.; Lammers, S.; Zimmer, D. (2018): Ein Beitrag zur Anpassung bestehender Konstruktionsmethodiken an die additiven Fertigungsverfahren. In: M. Kynast, M. Eichmann und G. Witt (Hg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D – International Trade Show + Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference, Erfurt, Germany, 5 – 7 June 2018. München: Carl Hanser, S. 128–134.

Lammers, S.; Tominski, J.; Magerkohl, S.; Künneke, T.; Lieneke, T.; Zimmer, D. (2018): Design guidelines for a software-supported adaptation of additively manufactured components with regard to a robust production. In: University of Texas (Hg.): Solide Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. An Additive Manufacturing Conference. Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, August 13–15. University of Texas, S. 527–540. Online verfügbar unter <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2018/046%20DesignGuidelinesforSoftwareSupportedAdaptat.pdf>, zuletzt geprüft am 01.15.2018.

- Langelaar, M. (2016): Topology Optimization of 3D Self-Supporting Structures for Additive Manufacturing. In: *Additive Manufacturing*. DOI: 10.1016/j.addma.2016.06.010.
- Langelaar, M. (2018): Combined optimization of part topology, support structure layout and build orientation for additive manufacturing. In: *Struct Multidisc Optim* 30 (5), S. 343. DOI: 10.1007/s00158-017-1877-z.
- Lee, Y.-L. (2005): Fatigue testing and analysis. (theory and practice). Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10128080>.
- Leutenecker-Twelsiek, B.; Klahn, C.; Meboldt, M. (2016): Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. In: *Procedia CIRP* 50, S. 408–413. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.016.
- Lhuissier, P.; Formanoir, C. de; Martin, G.; Dendievel, R.; Godet, S. (2016): Geometrical control of lattice structures produced by EBM through chemical etching: Investigations at the scale of individual struts. In: *Materials & Design* 110, S. 485–493. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.029.
- Lieneke, T.; Adam, G. A.O.; Leuders, S.; Knoop, F.; Josupeit, S.; Delfs, P. et al. (2015): Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions. Solid Freeform Fabrication Symposium. Laboratory for Freeform Fabrication, Advanced Manufacturing Center, University of Texas. Austin, TX, 2015. Online verfügbar unter <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-30-Lieneke.pdf>, zuletzt geprüft am 12.02.2016.
- Lieneke, T.; Denzer, V.; Adam, G. A.O.; Zimmer, D. (2016): Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling. In: *Procedia CIRP* 43, S. 286–291. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.361.
- Lippert, R. B. (2018): Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbauteile für das Selektive Laserstrahlschmelzen. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover. Fakultät für Maschinenbau. Online verfügbar unter <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/3519>, zuletzt geprüft am 06.07.2020.
- Lorensen, W. E.; Cline, H. E. (1987): Marching cubes. A high resolution 3D surface construction algorithm. In: M. C. Stone (Hg.): Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '87. the
-

14th annual conference. Not Known. New York, New York, USA: ACM Press, S. 163–169.

Lutzmann, S. (2010): Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Online verfügbar unter <http://www.iwb.tum.de/iwbmedia/Lutzmann.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2016.

Markl, M.; Körner, C. (2016): Multiscale Modeling of Powder Bed–Based Additive Manufacturing. In: *Annual Review of Materials Research* (46), 15.1 - 15.31. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-032158.

Markl, M.; Lodes, M.; Franke, M.; Körner, C. (2017): Additive manufacturing using selective electron beam melting (Welding and Cutting, 16). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Matthias_Markl/publication/317955281_Additive_manufacturing_using_selective_electron_beam_melting/links/595368460f7e9b329242af32/Additive-manufacturing-using-selective-electron-beam-melting.pdf, zuletzt geprüft am 24.08.2017.

Meindl, M. (2005): Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Online verfügbar unter <http://www.iwb.tum.de/iwbmedia/Meindl.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2016.

Mohammad, A.; Alahmari, A.; Moiduddin, K.; Mohammed, M.; Alomar, A.; Renganayagalu, R. (2016a): Porous γ -TiAl Structures Fabricated by Electron Beam Melting Process. In: *Metals* 6 (1), S. 25. DOI: 10.3390/met6010025.

Mohammad, A.; Mohammed, M. K.; Alahmari, A. M. (2016b): Effect of laser ablation parameters on surface improvement of electron beam melted parts. In: *Int J Adv Manuf Technol*. DOI: 10.1007/s00170-016-8533-4.

Mufti, S.; Smith, C.; Tennant, A.; Seed, L. (2017): Selective Electron Beam Melting Manufacturing of Electrically Small Antennas. In: *Adv. sci. technol. eng. syst. j.* 2 (6), S. 70–75. DOI: 10.25046/aj020609.

Murr, L. E. (2017): Open-cellular metal implant design and fabrication for biomechanical compatibility with bone using electron beam melting. In: *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2017.02.019.

Murr, L. E.; Esquivel, E. V.; Quinones, S. A.; Gaytan, S. M.; Lopez, M. I.; Martinez, E. Y. et al. (2009): Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid

- manufactured Ti–6Al–4V biomedical prototypes compared to wrought Ti–6Al–4V. In: *Materials Characterization* 60 (2), S. 96–105. DOI: 10.1016/j.matchar.2008.07.006.
- Murr, L. E.; Gaytan, S. M.; Martinez, E.; Medina, F.; Wicker, R. B. (2012): Next generation orthopaedic implants by additive manufacturing using electron beam melting. In: *International journal of biomaterials* 2012, S. 245727. DOI: 10.1155/2012/245727.
- Muzangaza, E. (2018): The Effects of Titanium Ti-6Al-4V Powders Manufactured Using Electron Beam Melting (EBM) - Additive Manufacturing on Metallurgical Evaluation. Masterthesis. University of Birmingham, Birmingham. School of Metallurgy and Materials. Online verfügbar unter <http://etheses.bham.ac.uk/8708/1/Muzangaza18MScbyRes.pdf>, zuletzt geprüft am 02.01.2019.
- Naujoks, G. (1991): Ein neuer Ansatz zur Bestimmung theoretischer Obergrenzen für das zweidimensionale orthogonale homogene Packproblem. In: *OR Spektrum* 13 (4), S. 224–228. DOI: 10.1007/BF01719398.
- ISO/ASTM 52921, 2013: Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung – Koordinatensysteme und Prüfmethodologien (ISO/ASTM 52921:2013); Deutsche und Englische Fassung FprEN ISO/ASTM 52921:2016.
- Nutal, N.; Collette, J. P.; Duminica, F.; Georges, C.; Le Cruz, S.; Magnien, J. et al. (2018): POST PROCESSING OF METAL PARTS MADE BY ADDITIVE MANUFACTURING. In: ASMET (Hg.): MAMC - Metal Additive Manufacturing Conference. Wirtschaftskammer Österreich, 21.-32. November, S. 247–256.
- Patterson, A.; Messimer, S. L.; Farrington, P. A. (2017): Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. DOI: 10.20944/preprints201703.0202.v2.
- Pérez-Sánchez, A.; Yáñez, A.; Cuadrado, A.; Martel, O.; Nuño, N. (2018): Fatigue behaviour and equivalent diameter of single Ti-6Al-4V struts fabricated by Electron Beam Melting orientated to porous lattice structures. In: *Materials & Design*. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.05.066.
- Persenot, T.; Burr, A.; Martin, G.; Buffiere, J.-Y.; Dendievel, R.; Maire, E. (2018a): Effect of build orientation on the fatigue properties of as-built Electron Beam Melted Ti-6Al-4V alloy. In: *International Journal of Fatigue*. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.08.006.

- Persenot, T.; Martin, G.; Dendievel, R.; Buffière, J.-Y.; Maire, E. (2018b): Enhancing the tensile properties of EBM as-built thin parts. Effect of HIP and chemical etching. In: *Materials Characterization*. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.01.035.
- Peters, M. (2007): Titan und Titanlegierungen. 3., völlig neu bearb. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- Petrovic, V.; Vicente Haro Gonzalez, J.; Jordá Ferrando, O.; Delgado Gordillo, J.; Ramón Blasco Puchades, J.; Portolés Griñan, L. (2010): Additive layered manufacturing. Sectors of industrial application shown through case studies. In: *International Journal of Production Research* 49 (4), S. 1061–1079. DOI: 10.1080/00207540903479786.
- Piaget, A.; Museau, M.; Paris, H. (2016): Manufacturing Space Homogeneity in Additive Manufacturing – Electron Beam Melting Case. Proceedings of the 14th International Conference on Management and Innovative Technologies. MIT. Fiesa, Slovenia, Sep. 2016. Online verfügbar unter <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01390804/document>, zuletzt geprüft am 21.12.2017.
- Priarone, P. C.; Ingarao, G.; Di Lorenzo, R.; Settineri, L. (2016): Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions. In: *Journal of Industrial Ecology*. DOI: 10.1111/jiec.12523.
- Price, S.; Cheng, B.; Lydon, J.; Cooper, K.; Chou, K. (2014): On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Process Parameter Effects. In: *J. Manuf. Sci. Eng.* 136 (6), S. 61019. DOI: 10.1115/1.4028485.
- VDMA 34160, Juni 2006: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen.
- Rafi, K.; Karthik, N. V.; Starr, T.; Stucker, B. (2012a): Mechanical property evaluation of Ti-6Al-4V parts made using Electron Beam Melting. J. B. Speed School of Engineering. Louisville, Kentucky. Online verfügbar unter <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-41-Rafi.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2016.
- Rafi, K.; Karthik N.V; Thomas L. Starr; Brent E. Stucker (2012b): Defect formation in EBM parts built in horizontal orientation. Department of Industrial Engineering, University of Louisville. Louisville, KY 40292. Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-35-Rafi.pdf>, zuletzt geprüft am 21.07.2017.

- Ranjan, R.; Yang, Y.; Langelaar, M. (2017): Controlling Local Overheating in Topology Optimization for Additive Manufacturing. Leuven, Belgium (Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Rajit_Ranjan/publication/323259063_Controlling_Local_Overheating_in_Topology_Optimization_for_Additive_Manufacturing/links/5a8aac6a0f7e9b1a95547897/Controlling-Local-Overheating-in-Topology-Optimization-for-Additive-Manufacturing.pdf, zuletzt geprüft am 05.03.2018.
- Rännar, L.-E.; Glad, A.; Gustafson, C.-G. (2007): Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting. In: *Rapid Prototyping Journal* 13 (3), S. 128–135. DOI: 10.1108/13552540710750870.
- Rehme, O. (2010): Cellular Design for Laser Freeform Fabrication. 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag (Schriftenreihe Lasertechnik, v.4). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5020518>.
- Reiher, T.; Koch, R. (2016): Product Optimization with and for AM. In: *Solid Freeform Fabrication Symposium 27*, S. 2236–2249. Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/179-Reiher.pdf>, zuletzt geprüft am 20.01.2016.
- Riedlbauer, D.; Scharowsky, T.; Singer, R. F.; Steinmann, P.; Körner, C.; Mergheim, J. (2016): Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. In: *Int J Adv Manuf Technol*. DOI: 10.1007/s00170-016-8819-6.
- Rochman, A.; Kate Borg, A. (2014): Design and Manufacture of Injection Mold Inserts Using Electron Beam Melting. In: *J. Manuf. Sci. Eng.* 136 (6), S. 061011-1-061011-8. DOI: 10.1115/1.4028541.
- Rosen, D. W. (2007): Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. In: *Computer-Aided Design and Applications* 4 (5), S. 585–594. DOI: 10.1080/16864360.2007.10738493.
- Ruppert, D. S.; Harrysson, O. L. A.; Marcellin-Little, D. J.; Abumoussa, S.; Dahners, L. E.; Weinhold, P. S. (2017): Osseointegration of Coarse and Fine Textured Implants Manufactured by Electron Beam Melting and Direct Metal Laser Sintering. In: *3D Printing and Additive Manufacturing* 4 (2), S. 91–97. DOI: 10.1089/3dp.2017.0008.
- Saaty, T. L. (2012): Decision making for leaders. The analytic hierarchy process for decisions in a complex world. 3. ed., 5 print. Pittsburgh, Pa.: RWS Publ.

- Safdar, A.; He, H. Z.; Wei, Liu-Ying; Snis, A.; Chavez de Paz, Luis E. (2012): Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. In: *Rapid Prototyping Journal* 18 (5), S. 401–408. DOI: 10.1108/13552541211250391.
- Sames, W. J.; List, F. A.; Pannala, S.; Dehoff, R. R.; Babu, S. S. (2016): The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. In: *International Materials Reviews* 61 (5), S. 315–360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649.
- Sato, M.; Takakuwa, O.; Nakai, M.; Niinomi, M.; Takeo, F.; Soyama, H. (2016): Using Cavitation Peening to Improve the Fatigue Life of Titanium Alloy Ti-6Al-4V Manufactured by Electron Beam Melting. In: *MSA* 07 (04), S. 181–191. DOI: 10.4236/msa.2016.74018.
- Scharowsky, T.; Bauereiß, A.; Körner, C. (2017): Influence of the hatching strategy on consolidation during selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. In: *Int J Adv Manuf Technol* 9 (5), S. 360. DOI: 10.1007/s00170-017-0375-1.
- Schiller, S.; Heisig, U.; Panzer, S. (1977): Elektronenstrahltechnologie. Stuttgart: Wiss. Verl.-Ges.
- Schmelzle, J.; Kline, E. V.; Dickman, C. J.; Reutzler, E. W.; Jones, G.; Simpson, T. W. (2015): (Re)Designing for Part Consolidation: Understanding the Challenges of Metal Additive Manufacturing. In: *J. Mech. Des* 137 (11), S. 111404. DOI: 10.1115/1.4031156.
- Schmidt, F. (1996): Gemeinkostensenkung durch kostengünstiges Konstruieren. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-99809-5>.
- Schmidt, G. (2014): Organisation und Business Analysis. Methoden und Techniken. 15., unveränderte Auflage. Gießen: Verlag Dr. Götz Schmidt (ibo-Schriftenreihe, 1).
- Schmidt, M.; Merklein, M.; Bourell, D.; Dimitrov, D.; Hausotte, T.; Wegener, K. et al. (2017): Laser based additive manufacturing in industry and academia. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.011.
- DIN 17864, März 2012: Schmiedestücke aus Titan und Titan-Knetlegierungen (Freiform- und Gesenkschmiedeteile) – Technische Lieferbedingungen.
- Schöne, C. (2013): 3D-Digitalisierung und Reverse Engineering. Hg. v. Technische Universität Dresden. Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion. Dresden.

- Schultz, H. (2000): Elektronenstrahlschweißen. 2., völlig überarb. und erw. Aufl. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl. (Fachbuchreihe Schweißtechnik, 93).
- Schumacher, A. (2013): Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Lehrbuch). Online verfügbar unter https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-34700-9_8.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2018.
- Scott, J.; Gupta, N.; Weber, C.; Newsome, S.; Wohlers, T.; Caffrey, T. (2012): Additive Manufacturing: Status and Opportunities. Science and Technology Policy Institute. Online verfügbar unter https://cgsr.llnl.gov/content/assets/docs/IDA_AdditiveM3D_33012_Final.pdf, zuletzt geprüft am 12.02.2016.
- Seabra, M.; Azevedo, J.; Araújo, A.; Reis, L.; Pinto, E.; Alves, N. et al. (2016): Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components. In: *Procedia Structural Integrity* 1, S. 289–296. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.02.039.
- SGV (2009): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: industrielle Revolution. Hg. v. Springer Gabler Verlag. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/73533/industrielle-revolution-v4.html>, zuletzt geprüft am 19.03.2018.
- SGV (2017): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Industrie 4.0. Hg. v. Springer Gabler Verlag. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/-2080945382/industrie-4-0-v3.html>, zuletzt geprüft am 20.03.2018.
- Sharma, H.; Parfitt, D.; Syed, A. K.; Wimpenny, D.; Muzangaza, E.; Baxter, G.; Chen, B. (2018): A critical evaluation of the microstructural gradient along the build direction in electron beam melted Ti-6Al-4V alloy. In: *Materials Science and Engineering: A*. DOI: 10.1016/j.msea.2018.12.016.
- Shrestha, S.; Chou, K. (2017): Process Effect on Part Surface Roughness in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing. Mechanical Engineering Department, University of Alabama. Tuscaloosa, AL 35487, USA.
- Shui, X.; Yamanaka, K.; Mori, M.; Nagata, Y.; Kurita, K.; Chiba, A. (2016): Effects of post-processing on cyclic fatigue response of a titanium alloy additively manufactured by electron beam melting. In: *Materials Science and Engineering: A*. DOI: 10.1016/j.msea.2016.10.059.

- Sidambe, A. T. (2017): Three dimensional surface topography characterization of the electron beam melted Ti6Al4V. In: *Metal Powder Report*. DOI: 10.1016/j.mprp.2017.02.003.
- Sigl, M. (2008): Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Online verfügbar unter <http://www.iwb.tum.de/iwbmedia/Sigl.pdf>, zuletzt geprüft am 08.02.2016.
- Sing, S. L.; An, J.; Yeong, W. Y.; Wiria, F. E. (2015): Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. In: *Journal of orthopaedic research : official publication of the Orthopaedic Research Society*. DOI: 10.1002/jor.23075.
- Smith, C. J.; Derguti, F.; Hernandez Nava, E.; Thomas, M.; Tammam-Williams, S.; Gulizia, S. et al. (2016): Dimensional accuracy of Electron Beam Melting (EBM) additive manufacture with regard to weight optimized truss structures. In: *Journal of Materials Processing Technology* 229, S. 128–138. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.08.028.
- Soyama, H.; Okura, Y. (2018): The use of various peening methods to improve the fatigue strength of titanium alloy Ti6Al4V manufactured by electron beam melting. In: *AIMS Materials Science* 5 (5), S. 1000–1015. DOI: 10.3934/matserci.2018.5.1000.
- ISO/ASTM 52915, 19.10.2015: Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2. Online verfügbar unter http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=67472, zuletzt geprüft am 05.02.2016.
- Spiering, A. B.; Cloots, M.; Wegener, K. (2018): Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/289299663_Assessing_new_support_minimizing_strategies_for_the_additive_manufacturing_technology_SLM, zuletzt geprüft am 19.09.2018.
- ASTM F 2924, 2014: Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion.
- Steinhilper, R.; Rieg, F. (2012): Handbuch Konstruktion. München: Hanser.
- Suard, M. (2015): Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting. Dissertation. University of Grenoble, Grenoble, France. Online verfügbar unter www.theses.fr/2015GREAI055.pdf, zuletzt geprüft am 08.02.2015.

- Sun, Y. (2016): Powder manipulation, microstructure, mechanical properties and bio-corrosion performance of titanium and titanium alloys additively manufactured by selective electron beam melting. Dissertation. RMIT University. School of Aerospace Mechanical and Manufacturing Engineering, zuletzt geprüft am 05.02.2017.
- Süß, M. (2015): Prozesskette zur Topologieoptimierung für das Generative Verfahren Elektronenstrahlschmelzen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Dresden. Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion.
- Süß, M.; Beyer, J.; Holtzhausen, S.; Sembdner, P.; Stelzer, R. (2018a): Methode zur prozessangepassten Erstellung von Stützstrukturen im CAD-Umfeld für die additive Fertigung. In: L. Paul, B. Hohnhäuser, G. Stanke und M. Pochanke (Hg.): 3D-NordOst 2018. 21. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten. 1. Auflage. Berlin: Gesellschaft z. Förderung angewandter Informatik, S. 67–75.
- Süß, M.; Herzog, M.; Schöne, C.; Stelzer, R. (2017): Effiziente Rekonstruktion topologieoptimierter Daten im CAE/CAM-Prozess. Efficient redesign of topology optimized results during CAE/CAM-process. In: M. Kynast, M. Eichmann und G. Witt (Hg.): Rapid.Tech - International Trade Show et Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 14th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 20-22 June 2017, Bd. 14. München: Carl Hanser Verlag, S. 67–79.
- Süß, M.; Hofmann, D.; Schöne, C.; Stelzer, R.; Klöden, B.; Kirchner, A. et al. (2018b): Investigation on Geometrical Accuracy and Their Measuring Capabilities in Electron Beam Melting for Different Machine Generations. In: B. Müller (Hg.): Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2018. Conference Proceedings, March 2018, Berlin, Germany. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Süß, M.; Klöden, B.; Kirchner, A.; Weißgärber, T.; Hofmann, D.; Schöne, C. et al. (2016a): Untersuchung zu Konstruktionsempfehlungen für kleine Strukturen beim Elektronenstrahlschmelzen. In: W. Kniffka, M. Eichmann und G. Witt (Hg.): Rapid.Tech - International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany, 14 - 16 June 2016. 13th. München: Carl Hanser Verlag (Proceedings of the 13th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany), S. 279–289.
- Süß, M.; Richter, R.; Hofmann, D.; Schöne, C.; Stelzer, R. (2018c): Einfluss des Topologieoptimierungsaufbaus und -ziels für eine maximale Materialausnutzung zur Weiterentwicklung eines Luftfahrtbauteils. In: M. Kynast, M. Eichmann und G. Witt (Hg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D – International Trade Show + Conference for Additive

Manufacturing. Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference, Erfurt, Germany, 5 – 7 June 2018. München: Carl Hanser, S. 65–80.

Süß, M.; Schöne, C.; Stelzer, R.; Klöden, B.; Kirchner, A.; Weißgärber, T.; Kieback, B. (2016b): Aerospace Case Study on Topology Optimization for Additive Manufacturing. In: B. Müller (Hg.): Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2016. Conference Proceedings, March 2016, Berlin, Germany. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, S. 37–42.

Tammas-Williams, S.; Zhao, H.; Léonard, F.; Derguti, F.; Todd, I.; Prangnell, P. B. (2015): XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti–6Al–4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting. In: *Materials Characterization* 102, S. 47–61. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.02.008.

Teufelhart, S. (2016): Belastungsoptimiertes Design nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung. Dissertation. Technische Universität München, München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1296003/1296003.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.

Thomas, D. (2009): The Development of Design Rules for Selective Laser Melting. Dissertation. University of Wales, Wales. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10369/913>, zuletzt geprüft am 15.02.2016.

Thompson, M. K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R. I.; Gibson, I. et al. (2016): Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.

Timmerhaus, K. D.; Barber, M. S. (Hg.) (1979): High-Pressure Science and Technology. Volume 1: Physical Properties and Material Synthesis / Volume 2: Applications and Mechanical Properties. Boston, MA, s.l.: Springer US. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4684-7470-1>.

DIN 17851, 1990: Titanlegierungen - Chemische Zusammensetzung.

Tominski, J.; Lammers, S.; Wulf, C.; Zimmer, D. (2018): METHOD FOR A SOFTWARE-BASED DESIGN CHECK OF ADDITIVELY MANUFACTURED COMPONENTS. In: University of Texas (Hg.): Solide Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. An Additive Manufacturing Conference. Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, August 13–15. University of Texas, S. 69–79. Online verfügbar unter

<http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2018/006%20MethodforaSoftwar eBasedDesignCheckofAdditi.pdf>.

Tomlin, M.; Meyer, J. (2011): Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part (The 7th Altair CAE Technology Conference). Online verfügbar unter <https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2013/10/Altair-Paper-Topology-Optimisation-of-Nacelle-Hinge-Matt-Tomlin.pdf>, zuletzt geprüft am 08.09.2018.

Tounsi, R.; Vignat, F. (2017): New concept of support structures in Electron Beam Melting manufacturing to reduce geomtricdefects. Experimental investigation. Colloque National AIP-Priméca. La Plagne, France. Online verfügbar unter <https://aip-primeca2017.sciencesconf.org/133128/document>, zuletzt geprüft am 03.01.2018.

Trenke, D. (2000): Konstruktionsregeln für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung von Werkzeugen und Prototypen. Institutsmitteilung Nr. 25. TU clausthal, Clausthal, DE. Institut für Maschinenwesen. Online verfügbar unter https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/Bilder/Forschung/Publikationen/Mitt_2000/2000_085_trenke.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2016.

Uçak, O. U. (2018): Static and Fatigue Characterization of Ti-6Al-4V Manufactured by Electron Beam Melting. Master Thesis. Politecnico de Milano. Department of aerospace science and technology. Online verfügbar unter https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/141451/3/2018_07_UCAK.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2018.

Vajna, S.; Bley, H.; Hehenberger, P.; Weber, C.; Zeman, K. (2009): *CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung*. 2., völlig neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10274774>.

Vatanabe, S. L.; Lippi, T. N.; Lima, C. R. de; Paulino, G. H.; Silva, E. C.N. (2016): Topology optimization with manufacturing constraints: A unified projection-based approach. In: *Advances in Engineering Software* 100, S. 97–112. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.07.002.

Vayre, B.; Vignat, F.; Villeneuve, F. (2012): Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. In: *Mechanics & Industry* 13 (2), S. 89–96. DOI: 10.1051/meca/2012003.

Vayre, B.; Vignat, F.; Villeneuve, F. (2013): Identification on Some Design Key Parameters for Additive Manufacturing: Application on Electron Beam Melting. In: *Procedia CIRP* 7, S. 264–269. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.045.

- Vock, S.; Klöden, B.; Kirchner, A.; Weißgärber, T.; Kieback, B. (2019): Powders for powder bed fusion. A review. In: *Prog Addit Manuf* 67, S. 544. DOI: 10.1007/s40964-019-00078-6.
- Volpe, Y.; Furferi, R.; Governi, L.; Uccheddu, F.; Carfagni, M.; Mussa, F. et al. (2018): Surgery of complex craniofacial defects. A single-step AM-based methodology. In: *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 165, S. 225–233. DOI: 10.1016/j.cmpb.2018.09.002.
- Walton, D.; Moztarzadeh, H. (2017): Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation. In: *Procedia CIRP* 60, S. 205–210. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.027.
- Wang, D.; Wu, S.; Bai, Y.; Lin, H.; Yang, Y.; Song, C. (2017a): Characteristics of typical geometrical features shaped by selective laser melting. In: *Journal of Laser Applications* 29 (2), 022007-1 - 022007-11. DOI: 10.2351/1.4980164.
- Wang, H.; Zhao, B.; Liu, C.; Wang, C.; Tan, X.; Hu, M. (2016a): A Comparison of Biocompatibility of a Titanium Alloy Fabricated by Electron Beam Melting and Selective Laser Melting. In: *PloS one* 11 (7), e0158513. DOI: 10.1371/journal.pone.0158513.
- Wang, J.; Tang, H. P.; Yang, K.; Liu, N.; Jia, L.; Qian, M. (2018a): Selective Electron Beam Manufacturing of Ti-6Al-4V Strips. Effect of Build Orientation, Columnar Grain Orientation, and Hot Isostatic Pressing on Tensile Properties. In: *JOM* 636, S. 103. DOI: 10.1007/s11837-018-2794-3.
- Wang, P.; Nai, M. L. S.; Sin, W. J.; Lu, S.; Zhang, B.; Bai, J. et al. (2018b): Realizing a full volume component by in-situ welding during electron beam melting process. In: *Additive Manufacturing* 22, S. 375–380. DOI: 10.1016/j.addma.2018.05.022.
- Wang, P.; Nai, M. L. S.; Sin, W. J.; Lu, S.; Zhang, B.; Bai, J. et al. (2019): Effect of overlap distance on the microstructure and mechanical properties of in situ welded parts built by electron beam melting process. In: *Journal of Alloys and Compounds* 772, S. 247–255. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.093.
- Wang, P.; Nai, M. L. S.; Tan, X.; Vastola, G.; Raghavan, S.; Sin, W. J. et al. (2016b): Recent Progress of Additive Manufactured Ti-6Al-4V by Electron Beam Melting. In: *Solid Freeform Fabrication Symposium 27th*. Online verfügbar unter <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/053-Wang.pdf>, zuletzt geprüft am 20.01.2017.

- Wang, P.; Sin, W. J.; Nai, M. L. S.; Wei, J. (2017b): Effects of Processing Parameters on Surface Roughness of Additive Manufactured Ti-6Al-4V via Electron Beam Melting. In: *Materials* 10 (10). DOI: 10.3390/ma10101121.
- Wang, Y.; Gao, J.; Kang, Z. (2018c): Level set-based topology optimization with overhang constraint. Towards support-free additive manufacturing. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. DOI: 10.1016/j.cma.2018.04.040.
- Warmuth, F.; Osmanlic, F.; Adler, L.; Lodes, M. A.; Körner, C. (2017): Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting. In: *Smart Mater. Struct.* 26 (2), S. 25013. DOI: 10.1088/1361-665X/26/2/025013.
- Weaver, J. M.; Barton, T. J.; Linn, J.; Jenkins, D.; Miles, M. P.; Smith, R. (2018): Quantifying accuracy of a concept laser metal additive machine through the NIST test artifact. In: *Rapid Prototyping Journal* 50 (4), S. 229. DOI: 10.1108/RPJ-01-2018-0029.
- Weißmann, V.; Drescher, P.; Bader, R.; Seitz, H.; Hansmann, H.; Laufer, N. (2017): Comparison of Single Ti6Al4V Struts Made Using Selective Laser Melting and Electron Beam Melting Subject to Part Orientation. In: *Metals* 7 (3), S. 91. DOI: 10.3390/met7030091.
- Welsch, Michael (2015): Bewertung von Spannungsspitzen und Singularitäten in FEM-Rechnungen. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/283045331_Bewertung_von_Spannungsspitzen_und_Singularitäten_in_FEM-Rechnungen, zuletzt geprüft am 18.01.2018.
- Wohlers, T.; Caffrey, T. (2015): Wohlers report 2015. 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates.
- Wohlers, T.; Gornet, T. (2015): History of additive manufacturing. Wohlers Association. Online verfügbar unter <http://wohlersassociates.com/history2015.pdf>, zuletzt geprüft am 27.03.2017.
- Wohlers, T. T. (2018): WOHLERS REPORT. 3d printing and additive manufacturing state of the industry. FORT COLLINS: Wohlers Associates.
- Yim, S.; Rosen, D. (2012a): Build Time and Cost Models for Additive Manufacturing Process Selection. In: Volume 2: 32nd Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Chicago, Illinois, USA, Sunday 12 August 2012: ASME, S. 375–382.

- Yim, S.; Rosen, D. W. (2012b): BUILD TIME AND COST MODELS FOR ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS SELECTION. In: *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computer and Information in Engineering Conference*. DOI: 10.1115/DETC2012.
- Yoder, S.; Morgan, S.; Kinzy, C.; Barnes, E.; Kirka, M.; Paquit, V. et al. (2017): Characterization of Topology Optimized Ti-6Al-4V Components using Electron Beam Powder Bed Fusion. In: *Additive Manufacturing*. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.001.
- Zäh, M. (Hg.) (2006): Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. München: Hanser (Kostengünstig Produzieren).
- Zhai, Y.; Galarraga, H.; Lados, D. A. (2016): Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM. In: *Engineering Failure Analysis*. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.036.
- Zhang, W.; Zhou, L. (2018): Topology optimization of self-supporting structures with polygon features for additive manufacturing. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. DOI: 10.1016/j.cma.2018.01.037.
- Zhang, X. Z.; Leary, M.; Tang, H. P.; Song, T.; Qian, M. (2018): Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications. Current status and outstanding challenges. In: *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. DOI: 10.1016/j.cossms.2018.05.002.
- Zhong, Y.; Rännar, L.-E.; Wikman, S.; Koptuyug, A.; Liu, L.; Cui, D.; Shen, Z. (2017): Additive manufacturing of ITER first wall panel parts by two approaches: Selective laser melting and electron beam melting. In: *Fusion Engineering and Design* 116, S. 24–33. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.032.
- Zippelius, T.; Strube, P.; Suleymanov, F.; Putzier, M.; Hölzl, A. (2018): Sicherheit und Effektivität eines in Electron-Beam-Melting-Technik hergestellten Titan-Mesh-Cages zur intersomatischen lumbalen Fusion. In: *Der Orthopäde*. DOI: 10.1007/s00132-018-03681-7.
- Zwier, M. P.; Wits, W. W. (2016): Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization. In: *Procedia CIRP* 55, S. 128–133. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.040.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Herausforderungen und deren Relevanz bei der industriellen Einführung der additiven Fertigung (DAT 2016).....	12
Abbildung 2	Aufbau einer Elektronenstrahlsäule (links) und des Arbeitsbereichs (rechts) einer Elektronenstrahlschmelzanlage	16
Abbildung 3	Ablauf eines Belichtungsschrittes einer Schicht beim Elektronenstrahlschmelzen (Sigl 2008).....	18
Abbildung 4	Maschinenkoordinatensystem (ISO/ASTM 52921).....	20
Abbildung 5	Beschreibung des Downskin- und Upskin-Winkels bei der additiven Fertigung (nach VDI 3405-3)	21
Abbildung 6	Standardformen von Stützstrukturen für die metalladditive Fertigung (Krol et al. 2012)	23
Abbildung 7	Schematische Darstellung des a) Treppenstufeneffekts und b) der daraus resultierenden, sichtbaren Oberflächenstrukturierung beim EBM (VDI 3405-3).....	25
Abbildung 8	Scanlinienbeschreibung beim EBM (Suard 2015).....	26
Abbildung 9	Methodeneinordnung in die Konstruktionsmethodik für die additive Fertigung (Eigene Darstellung in Anlehnung an Kumke 2018; VDI 2222-1).....	31
Abbildung 10	Ablauf einer Strukturoptimierung (Eigene Darstellung, nach Vajna et al. 2009; Schumacher 2013)	37
Abbildung 11	Fallunterscheidung aufgrund der Positionierung des ersten Rechtecks ..55	
Abbildung 12	Bauraumdemonstratoren in jeweils dreidimensionaler Ansicht (oben) und Draufsicht (unten) der Anlagen a) A2X und b) Q20plus	63
Abbildung 13	Größenabweichungen entsprechend der Koordinatenrichtung des Bauraumdemonstrators der A2X bezogen auf die Bauhöhe	65
Abbildung 14	Positionsabweichungen entsprechend der Koordinatenrichtung des Bauraumdemonstrators der A2X bezogen auf die Bauhöhe	66
Abbildung 15	Maximale, richtungsbezogene Positionsabweichungen (links) und deren Verlauf über die Bauhöhe (rechts) des Bauraumdemonstrators der A2X	67
Abbildung 16	Abweichungen der Arcam A2X bei der Höhenmessung bezogen auf die Bauhöhe.....	67

Abbildung 17 Größenabweichungen in X- und Y-Richtung des Bauraumdemonstrators der Q20plus bezogen auf die Bauhöhe.....	69
Abbildung 18 Positionsabweichungen in X- und Y-Richtung des Bauraumdemonstrators der Q20plus bezogen auf die Bauhöhe.....	70
Abbildung 19 Formabweichungen der Messkörper des Bauraumdemonstrators der Q20plus.....	71
Abbildung 20 Größen- und Positionsabweichungen in Z-Richtung des Bauraumdemonstrators der Q20plus bezogen auf die Bauhöhe.....	72
Abbildung 21 Positionsabweichungen der am Koordinatenursprung befestigten Messkörper (links) und der Messkörper der vereinzelt Stegstrukturen (rechts).....	73
Abbildung 22 Vereinheitlichte Darstellung der Z-Positionsabweichung der Bauraumdemonstratoren der A2X (links) und Q20plus (rechts).....	74
Abbildung 23 Geometriedemonstrator RTC-Probekörper und Nummerierung der Konstruktionselemente	76
Abbildung 24 Ergebnisse der Zylinder KE1 parallel zur Z-Richtung	77
Abbildung 25 Ergebnisse der Zylinder KE1 mit Achswinkel 45° zur Bauebene.....	78
Abbildung 26 Formabweichungen der um 45° geneigten Zylinder eines Demonstrators der a) A2X und b) Q20plus	79
Abbildung 27 Formabweichungen der Zylinder achsparallel zur Bauebene in a) dreidimensionaler Ansicht und b) der Schnittebenenansicht.....	80
Abbildung 28 Höhen- und Breitenabweichungen der Zylinder KE1 achsparallel zur Bauebene	81
Abbildung 29 Formabweichung im Bezug zum a) CAD der Bohrungsunterseiten des RTC-Probekörpers hergestellt mit der b) A2X und c) Q20plus.....	82
Abbildung 30 Abweichungen der Bohrungen KE2 achsparallel zur Z-Richtung	83
Abbildung 31 Formabweichungen verglichen mit a) dem CAD und den CT-Schnitten der Anlagen b) A2X und c) Q20plus	84
Abbildung 32 Abweichungen in Höhe und Breite der Bohrungen KE2 achsparallel zur Bauebene.....	85
Abbildung 33 Abweichungen der Wanddicken KE3 beider Anlagen	86
Abbildung 34 Abweichungen der Spaltbreite KE4 beider Anlagen.....	88
Abbildung 35 Winkelabweichungen der Downskin-Flächen KE5 abhängig vom Winkel	89
Abbildung 36 Höhenabweichungen der Überhänge KE6 der Demonstratoren.....	90
Abbildung 37 Demonstrator zur Untersuchung der Pulverentfernbarkeit	92

Abbildung 38 Darstellung der a) Öffnungen des Pulverentfernungsdemonstrators und b) Schnitt parallel zur Rohrflanschebene	95
Abbildung 39 Abweichungen der Rohrhöhe in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und der Rohrtiefe.....	95
Abbildung 40 Demonstrator zur Untersuchung des kritischen Überhangwinkels	96
Abbildung 41 Schematische Darstellung der Winkelabweichung zur Überhangcharakterisierung	97
Abbildung 42 Winkelabweichung der Downskin-Flächen in Abhängigkeit des Messprinzips	97
Abbildung 43 Demonstratoren zur Untersuchung der kritischen Überhanglänge mit Downskin-Winkel a) 0° und b) 5° zur Bauebene	98
Abbildung 44 Formabweichungen der Demonstratoren mit Downskin-Winkel a) $\delta = 5^\circ$ und b) $\delta = 0^\circ$ zur Untersuchung der kritischen Überhanglänge.....	98
Abbildung 45 Länge der ebenen Downskin-Fläche in Abhängigkeit der Höhe der Demonstratoren.....	99
Abbildung 46 Nummerierung der Probekörper (links) und deren jeweilige Stützstrukturgeometrie (rechts)	101
Abbildung 47 Ergebnisse der Bewertung einzelner Stützstrukturformen der ersten Versuchsreihe	102
Abbildung 48 Hergestellte Testgeometrien der Spaltuntersuchung (links) und die Stiftparametervariation (rechts) der Versuchsreihe 2	103
Abbildung 49 Ergebnisdarstellung Stifte als Stützstruktur der Versuchsreihen 2 und 3	104
Abbildung 50 Festigkeit schmaler Strukturen in Abhängigkeit des Zugprobendurchmessers und der Nachbearbeitung	106
Abbildung 51 Wirkungsbereich der TF in Abhängigkeit des Strukturverlaufs bei Downskin- Flächen bauebenenparallel (links) und mit einem Winkel $> 0^\circ$ zur Bauebene (rechts).....	111
Abbildung 52 Formabweichung des Bauraumdemonstrators der Anlage Arcam Q10 in Abhängigkeit der zu belichtenden Schmelzfläche.....	113
Abbildung 53 Darstellung des a) Upper Brackets und des b) Counter Brackets sowie des zusammengesetzten c) Main Gear Brackets.....	115
Abbildung 54 Darstellung der Lasten (links) und Position sowie Lastrichtung des MGB im Simulationsmodell der Rahmentragstruktur (rechts)	116
Abbildung 55 Darstellung a) der unveränderlichen, intransparenten Geometrien und b) des Drahtgittermodells des Startentwurfs der Optimierung.....	118

Abbildung 56 Ergebnisse der Rekonstruktionsmethoden a) CSG-Neukonstruktion, b) B-Rep-Rückführung und c) B-Rep-Neukonstruktion.....	120
Abbildung 57 Darstellung der Messabweichungen bei $C01 = 0,31$ (links) und $0,18$ (rechts).....	123
Abbildung 58 Darstellung des endbearbeiteten MGB (links) und der Einspannung auf dem Prüfstand (rechts).....	123
Abbildung 59 a) Konventionelle Konstruktion, b) unveränderlicher Designbereich und c) zur Verfügung stehendes, optimierbares Volumen des FSL	124
Abbildung 60 Verlauf der FSL-Strukturoptimierung vom a) Ausgangsmodell über die b) erste und c) zweite Optimierung sowie die d) Rekonstruktion und e) DfAM-Gestaltung zum f) mittels EBM hergestellten Bauteil	125
Abbildung 61 Darstellung des FCRC hergestellt mittels a) LBM und b) EBM.....	127
Abbildung 62 Kostenentwicklung des FSL in Abhängigkeit der Stückzahl	130
Abbildung 63 Festigkeitswerte anhand von Literaturergebnissen von EBM wie-gebaut Ti6Al4V Zugproben (Edwards et al. 2013; Karlsson 2015; Suard 2015; Everhart et al. 2016; Fousová et al. 2018; Dehoff et al. 2016; Uçak 2018; DIN 17864; DIN 17865).....	172
Abbildung 64 Ursache-Wirkungs-Diagramm des Elektronenstrahlschmelzens	179
Abbildung 65 Vorgehensmodell zur Lösungsfindung additiver Entwicklungs- und Konstruktions-aufgaben (Kumke 2018).....	180
Abbildung 66 Zusammenfassung der Rauheiten für Oberflächenwinkel $\nu = \delta = 90^\circ$ in Abhängigkeit der Messmethode	192
Abbildung 67 Einfluss der Prozessparameter und Messrichtung auf die Rauheit sowie Darstellung der Standardparameter des Anlagenherstellers (grau) (Eigene Darstellung nach Wang et al. 2017b).....	193
Abbildung 68 Einfluss des Oberflächenwinkels auf die Rauheit (Grandvallet et al. 2018; Mohammad et al. 2016b; Persenot et al. 2018a)	195
Abbildung 69 Berechnungsgrundlagen der Bauteilkosten beim Laserstrahlschmelzen (Kranz 2017; Yim und Rosen 2012a; Gibson et al. 2014; VDMA 34160; Feldhusen und Grote 2013).....	196
Abbildung 70 Kostenstruktur des EBM	199
Abbildung 71 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 5 mm	215
Abbildung 72 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 25 mm	215
Abbildung 73 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 55 mm	216

Abbildung 74 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 95 mm	216
Abbildung 75 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 145 mm	217
Abbildung 76 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 205 mm	217
Abbildung 77 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 275 mm	218
Abbildung 78 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 5 mm	218
Abbildung 79 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 25 mm	219
Abbildung 80 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 55 mm	219
Abbildung 81 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 95 mm	220
Abbildung 82 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 145 mm	220
Abbildung 83 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 205 mm	221
Abbildung 84 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 275 mm	221
Abbildung 85 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 8 mm	222
Abbildung 86 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 23,92 mm	222
Abbildung 87 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 51,52 mm	223
Abbildung 88 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 88,32 mm	223
Abbildung 89 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 134,32 mm	224
Abbildung 90 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 189,52 mm	224
Abbildung 91 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 8 mm	225

Abbildung 92 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 23,92 mm	225
Abbildung 93 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 51,52 mm	226
Abbildung 94 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 88,32 mm	226
Abbildung 95 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 134,32 mm	227
Abbildung 96 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 189,52 mm	227
Abbildung 97 Einteilung der untersuchten Konstruktionselemente des Geometriedemonstrators	228
Abbildung 98 Demonstrator zur Untersuchung der Pulverentfernbarkeit	230
Abbildung 99 Probekörpermaße (oben), Nummerierung (links) und Stützstrukturgeometrien (rechts) der Versuchsreihe 1 zur Untersuchung der Stützstrukturgestalt.....	231

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Potenziale des EBM, deren Berechnung und Bewertung	51
Tabelle 2	Grundlegende Maschinenparameter der Versuchsanlagen.....	60
Tabelle 3	Skalierungsfaktoren der EBM-Anlagen	61
Tabelle 4	Zuordnung der Messstrategien zu den jeweiligen Demonstratoren	62
Tabelle 5	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Abweichungen der Bauraumdemonstratoren	75
Tabelle 6	Ergebnisse der Pulverentfernungsversuche.....	93
Tabelle 7	Beschreibung der Versuche zur Festigkeit schmaler Strukturen	105
Tabelle 8	Gekürzte Form des Konstruktionskataloges für EBM.....	109
Tabelle 9	Berücksichtigung der Gestaltungsempfehlungen für den Optimierungsprozess	114
Tabelle 10	Festigkeitsnachweise des MGB	121
Tabelle 11	Vergleich der Optimierungsziele und -ergebnisse des FCRC untereinander und in Bezug auf dessen Ursprungsdesign und -optimierung.....	127
Tabelle 12	Gesamtkosten für die Herstellung der Bauteile mit der Arcam Q20plus ...	129
Tabelle 13	Vergleich der physikalisch-technischen Merkmale des Laser- und Elektronenstrahlschmelzens	170
Tabelle 14	Chemische Spezifikation der Titanlegierung Ti6Al4V (Arcam AB; DIN 17851; DIN 17865).....	171
Tabelle 15	Mechanische Spezifikation der Titanlegierung Ti6Al4V (Arcam AB; DIN 17864; DIN 17865).....	171
Tabelle 16	Auswirkungen von EBM-Prozessparameteränderungen auf die Prozessführung und das Herstellergebnis.....	173
Tabelle 17	Übersicht zu Leichtbaupotenzialen durch eine Strukturoptimierung für die additive Fertigung	181
Tabelle 18	Regeln zur Konstruktion für metalladditive Fertigungsverfahren (nach Zäh 2006)	185
Tabelle 19	Verfahrensbezogene Einordnung von Literaturergebnissen zu geometriebezogenen Untersuchungen beim LBM und EBM	186
Tabelle 20	Rauheitswerte für EBM und Ti6Al4V in Abhängigkeit der Messmethode an Oberflächenwinkeln $\nu = \delta = 90^\circ$	189
Tabelle 21	Oberflächenwinkelabhängige Rauheitswerte	194
Tabelle 22	Beschreibung der an der Kostenberechnung beteiligten Größen	197

Tabelle 23 Ergebnisse der Potenzialberechnung anhand ausgewählter Beispiele im Vergleich zur erfahrungsbasierten, subjektiven Bewertung	198
Tabelle 24 Werte und Annahmen zur Kostenermittlung des EBM	200
Tabelle 25 Gesamtkosten der Fallbeispiele aus Abschnitt 5 für die Herstellung mit der A2X.....	202
Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien	203
Tabelle 27 Beschreibung der Konstruktionselemente.....	229
Tabelle 28 Beschreibung des Demonstrators zur Pulverentfernbarkeit.....	230
Tabelle 29 Beschreibung der Stützstrukturformen.....	231
Tabelle 30 Bewertungstabelle der Versuchsreihe 1 zur Charakterisierung der Stützstrukturformen.....	232
Tabelle 31 Bewertungstabelle der Versuchsreihe 2 und 3 zur Charakterisierung der Stützstrukturformen.....	234
Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V	235

Anlagen

A-1	Verfahrensvergleich des Laser- und Elektronenstrahlschmelzens	170
A-2	Werkstoffeigenschaften des Ti6Al4V	171
A-3	Einfluss der Prozessparameter auf das Herstellergebnis	173
A-4	Ursache-Wirkungs-Diagramm für das Elektronenstrahlschmelzen.....	179
A-5	Konstruktionsmethodik für die additive Fertigung.....	180
A-6	Recherche zu Leichtbaupotenzialen bei metallbasierten AF-Verfahren	181
A-7	Grundregeln der Konstruktion für metalladditive Herstellverfahren	185
A-8	Einordnung der Untersuchungen zu herstellbaren Geometrien.....	186
A-9	Recherchen zu Rauheiten des EBM	189
A-10	Kostenstruktur und -berechnung der laserbasierten Bauteilfertigung	196
A-11	Validierung der Potenzialabschätzung	198
A-12	Kostenstruktur des EBM	199
A-13	Prozessparameter der Versuchsreihen.....	203
A-14	Abweichungen der Bauraumdemonstratoren.....	215
A-15	Konstruktionselemente des Geometriedemonstrators.....	228
A-16	Demonstrator zur Pulverentfernung	230
A-17	Beschreibung der Stützstrukturgestalt	231
A-18	Untersuchungen der Stützstrukturgestalt.....	232
A-19	Konstruktionskatalog für EBM mit Ti6Al4V.....	235

A-1 Verfahrenvergleich des Laser- und Elektronenstrahlschmelzens

Tabelle 13 Vergleich der physikalisch-technischen Merkmale des Laser- und Elektronenstrahlschmelzens

Eigenschaft	LBM	EBM	Quelle
Energiequelle	Laserstrahl	Elektronenstrahl	(Gibson et al. 2014)
Atmosphäre	Inertgas	Vakuum	
Strahlführung	Galvanometer	Ablenkspulen	
Energieaufnahme	Absorbierend	Leitfähig	
Werkstoffe	Polymere, Metalle & Keramik	Metalle	
Energiekosten	Hoch	Mittel	
Pulverkorngrößenverteilung	Fein (10 µm - 60 µm)	Mittel (45 µm - 150 µm)	(Vock et al. 2019)
Pulvervorheizung	Infrarot- oder Widerstandsheizung (Bauplatte bis 500° C)	Elektronenstrahl (Schichtweise bis zu 1100° C)	
Schichtdicke (µm)	20 - 100	50 - 200	(Vayre et al. 2012)
Aufbaurrate (cm³/h)	5 - 20	55 - 80	
Dimensionale Genauigkeit	0,1 mm - 0,5 mm	0,2 mm - 1 mm	(Badiru et al. 2017)
Rauheit (µm)	<i>Ra</i> 9-12	<i>Ra</i> 25-35	
Eigenspannungen	Hoch	Niedrig	
Spannungsarmglühen	Empfohlen	Nicht notwendig	
Gasverbrauch	3500 l/h Stickstoff	1 l/h Helium im Prozess, 50 l/h - 75 l/h zur Abkühlung (optional)	(Baumers et al. 2016)
Mechanisches Abtrennen von der Bauplatte	Immer notwendig	Materialabhängig	
Wärmebehandlung im Prozess	Nicht möglich	Möglich	(Sames et al. 2016)
Prozessreinigung	Loses Pulver	Gesintertes Pulver	
Rissanfälligkeit	Gegeben	Untypisch	
Porosität im Bauteil	Ca. 0,37 %	0,15 % - 0,21 %	(Fousová et al. 2018; Hrabec und Quinn 2013b)

A-2 Werkstoffeigenschaften des Ti6Al4V

Tabelle 14 Chemische Spezifikation der Titanlegierung Ti6Al4V (Arcam AB; DIN 17851; DIN 17865)

Chemische Spezifikation Ti6Al4V	Datenblatt des Anlagenherstellers (Arcam AB)	DIN 17851 (chemische Zusammensetzung)	DIN 17865 (Gusslegierung)
Aluminium	6 %	5,5 % - 6,75 %	5,5 % - 6,75 %
Vanadium	4 %	3,5 % - 4,5 %	3,5 % - 4,5 %
Kohlenstoff	0,03 %	< 0,08 %	< 0,1 %
Eisen	0,1 %	< 0,3 %	< 0,25 %
Sauerstoff	0,15 %	< 0,2 %	< 0,25 %
Stickstoff	0,01 %	< 0,05 %	< 0,05 %
Wasserstoff	0,003 %	< 0,015 %	< 0,015 %
Sonstige	-	< 0,4 %	< 0,4 %
Titan	Rest	Rest	Rest

Tabelle 15 Mechanische Spezifikation der Titanlegierung Ti6Al4V (Arcam AB; DIN 17864; DIN 17865)

Mechanische Spezifikation Ti6Al4V	Datenblatt des Anlagenherstellers (Arcam AB)	DIN 17865 (Gusslegierung)	DIN 17864 (Knetlegierung)
Zugfestigkeit	1020 MPa	> 880 MPa	> 900 MPa
0,2 %-Dehngrenze	950 MPa	> 785 MPa	> 830 MPa
Bruchdehnung	14 %	> 5 %	> 8 %
Brucheinschnürung	40 %	-	> 15 %
Lebenszyklen* bei 600 MPa	> 10e-6 Zyklen	-	-
Rockwell Härte	33 HR	-	-
E-Modul	120 GPa	-	-

* nach HIP

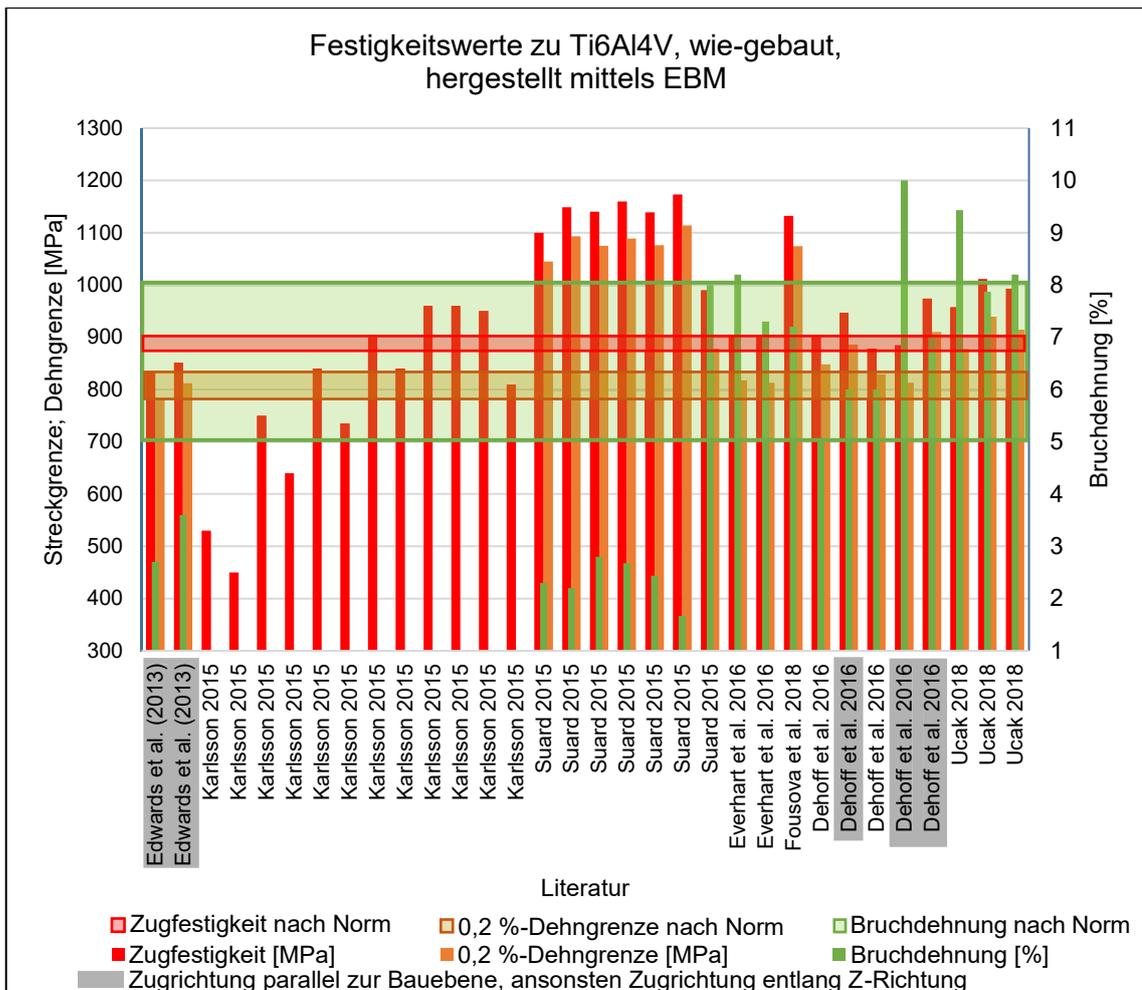


Abbildung 63 Festigkeitswerte anhand von Literaturergebnissen von EBM wie-gebaut Ti6Al4V Zugproben (Edwards et al. 2013; Karlsson 2015; Suard 2015; Everhart et al. 2016; Fousova et al. 2018; Dehoff et al. 2016; Ucak 2018; DIN 17864; DIN 17865)

A-3 Einfluss der Prozessparameter auf das Herstellergesamnis beim EBM

Tabelle 16 Auswirkungen von EBM-Prozessparameteränderungen auf die Prozessführung und das Herstellergesamnis

Hauptprozess-thema	Untersuchter Teilprozessparameter	Quelle	Anlage / Material	Bemerkungen
Allgemein	Manuelle Linienenergieberechnung	(Hrabe und Quinn 2013a)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Die manuelle Strahlführung erzeugt Porositäten in Randbereichen von Bauteilen. Im Inneren des Bauteils ist kein Unterschied festzustellen, wodurch auch die Festigkeit annähernd gleich bleibt.
	Linienenergie	(Markl und Körner 2016; Riedlbauer et al. 2016)	Allgemein	Höhere Linienenergie führt zu erhöhten minimalen Wandstärken in Z-Richtung.
	Nutzung von Pulver im Bereich 25 µm - 45 µm	(Karlsson Algardh et al. 2016)	Arcam A2 / Ti6Al4V	Änderung folgender Parameter notwendig: Beam Focus von 35 mA auf 10 mA, Vorheizen: Beam Speed von 14700 mm/s auf 22000 mm/s, Current von 5 mA auf 25 mA und Wiederholrate erhöht auf 15 mA.
	Vorheizen der Bauplatte, des Pulvers und Zwischenheizen	(Al-Bermani 2011)	Allgemein	Ist in bestimmten Temperaturbereichen notwendig für einen stabilen Bauzyklus. Zu niedrige Temperaturen führen zu Pulveraufstauben, wohingegen zu hohe Temperaturen zu möglicher Schichtaufwölbung oder Überhitzung der Struktur führt.
Vorheizen (Preheating)	Scangeschwindigkeit (8600 mm/s - 14600 mm/s)	(Drescher et al. 2016)	Arcam A1 / Ti6Al4V	Die Verringerung der Scangeschwindigkeit führt zu stärkerer Versinterung der Pulverpartikel. Dennoch wird der Vorheizvorgang ≤ 8600 mm/s instabiler. Der erhöhte Energieeintrag führt zur stärkeren Abstoßungskräften, welche die Bindungskräfte übersteigen und wodurch Pulver aufstaubt.

Tabelle 16 Auswirkungen von EBM-Prozessparameteränderungen auf die Prozessführung und das Herstellergebnis (Fortsetzung)

Hauptprozesssthema	Untersuchter Teilprozessparameter	Quelle	Anlage / Material	Bemerkungen
Schmelzen (Melt)	Max Current (10 mA; 20 mA; 30 mA)	(Gong 2013)	Arcam S400 / Ti6Al4V	Mit steigendem maximalen Strom verringert sich die Porosität.
	Max Current	(Safdar et al. 2012; Körner et al. 2013)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Die Rauheit steigt mit steigendem Strahlstrom.
	Max Current (3 mA; 6 mA; 9 mA; 12 mA; 15 mA; 18 mA; 21 mA; 24 mA) Max. Speed (0,5 m/s; 1 m/s - 12 m/s)	(Kirchner et al. 2014)	Arcam A2 / Ti6Al4V	Mit steigendem Strahlstrom und verringerten Scangeschwindigkeiten verringert sich die Porosität. Zu hoher Strahlstrom bei zu geringer Scangeschwindigkeit und folglich zu hohe Linienenergie führen zu Materialanhäufungen und welligen Oberflächen.
	Ausschließliche Nutzung von Konturlinien zur Schichterzeugung	(Suard 2015)	Arcam A1 / Ti6Al4V	Dies führt zu signifikant mehr Porosität (> 3 %) im Bauteil, was mit Prozessparameteranpassung behoben werden kann. Flächenschmelzen erzeugt weniger Poren im Bauteil.
		(Tammam-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Es sind signifikant weniger Porositäten im Bauteil als mit dem Standardschmelzthema.
		(Sun 2016)	Arcam A1 / Ti6Al4V	Die Porosität steigt. Es entstehen schmelzfehlerbedingten Poren.

Tabelle 16 Auswirkungen von EBM-Prozessparameteränderungen auf die Prozessführung und das Herstellergebnis (Fortsetzung)

Hauptprozesssthema	Untersuchter Teilprozessparameter	Quelle	Anlage / Material	Bemerkungen
Schmelzen (Melt)	Ausschließliche Nutzung der Flächenfüllung zur Schichterzeugung	(Tamas-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Dies erzeugt leicht höhere Porosität im Randbereich als das Standardschmelzthema.
		(Smith et al. 2016)	Arcam A1 / Ti6Al4V	Abschaltung des Konturschmelzens führt zur Verringerung der Formabweichungen von 41,2 % auf 5,4 % bei 60° Überhangstrukturen. Erzeugte Strukturen weisen Poren auf, deren Vermeidung durch Anpassung anderer Prozessparameter ermöglicht werden kann.
	Hatchlinienabstand, Line Offset	(Scharowsky et al. 2017)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Mit steigendem Hatchlinienabstand erhöht sich die Rauheit nach oben gerichteter Flächen.
	Line Offset (0,2 mm; 0,15 mm; 0,1 mm)	(Tamas-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Durch Verringerung des Abstandes zwischen den einzelnen Linien vom Ausgangswert 0,2 mm verringert sich die Porosität im Bauteil.
	Line Offset (0,1 mm - 0,3 mm)	(Gong 2013)	Arcam S400 / Ti6Al4V	Mit steigendem Line Offset erhöht sich die Porosität. Signifikant ist dies ab 0,18 mm zu beobachten. Durch steigende Abstände der Linien entstehen nicht verschmolzene Bereiche.

Tabelle 16 Auswirkungen von EBM-Prozessparameteränderungen auf die Prozessführung und das Herstellergebnis (Fortsetzung)

Hauptprozesssthema	Untersuchter Teilprozessparameter	Quelle	Anlage / Material	Bemerkungen
Schmelzen (Melt)	Focus Offset (19 mA; 12 mA; 6 mA; 0 mA)	(Tammam-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Die Verringerung des Focus Offset vom Ausgangswert 19 mA auf 3 mA verringert die Porosität des Bauteils. Wird der Wert kleiner als 3 mA, steigt die Porosität.
	Focus Offset (4 mA - 24 mA)	(Gong 2013; Safdar et al. 2012)	Arcam S400 / Ti6Al4V Arcam S12 / Ti6Al4V	Im Bereich von 4 mA - 16 mA ist kein Einfluss auf die Porosität erkennbar. Ab 16 mA steigt diese signifikant. Die Aufweitung des Strahls im Schmelzpunkt verringert die Energiekonzentration, so dass Poren durch zu geringer Schmelztiefe entstehen. Die Aufweitung kann jedoch auf nach oben gerichteten Flächen die Rauheit reduzieren.
	Focus Offset (-5 mA; 0 mA; 5 mA; 10 mA; 15 mA)	(Sun 2016)	Arcam A1 / Ti6Al4V	Sowohl geringerer als auch erhöhter Focus Offset ausgehend vom Standardwert 5 erhöht die Porosität.
	Scan Speed	(Safdar et al. 2012)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Mit Steigerung der Scangeschwindigkeit verringert sich die Rauheit.
	Unidirektionales Schmelzen (Abschaltung der mäanderartigen Belichtung)	(Tammam-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Gleichgerichtete Scanlinien führen zur Porenanhäufung an deren Ende.

Tabelle 16 Auswirkungen von EBM-Prozessparameteränderungen auf die Prozessführung und das Herstellergebnis (Fortsetzung)

Hauptprozesssthema	Untersuchter Teilprozessparameter	Quelle	Anlage / Material	Bemerkungen
Schmelzen (Melt)	Erhöhung der Anzahl an Konturlinien	(Tammias-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Dies führt zu weniger Porosität in den Bereichen, welche mit Konturlinien geschmolzen werden, was mit der Zunahme der Linienanzahl (von 3 auf 5) begründet ist.
	Konturlinien von innen nach außen	(Tammias-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Es ist kein Unterschied zum Ablauf von außen nach innen zu erkennen.
	Flächenschmelzen zuerst	(Tammias-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Dies erzeugt weniger Poren im Übergangsbereich von Flächen- zu Konturschmelzen im Gegensatz zum Standardthema Kontur vor Fläche.
	Contour Offset	(Formanoir et al. 2016)	Arcam A2 / Ti6Al4V	Tragende Probendurchmesser werden mit einem Contour Offset von 0,29 um ca. 0,15 µm pro Oberfläche zu schmal, wodurch wie-gebaut Werte signifikant unterhalb bearbeiteter Proben liegen.
	Mehrfaches Aufschmelzen	(Sun 2016)	Arcam A1 / Ti6Al4V	Multiples Aufschmelzen kann die Porosität erhöhen, führt mitunter zur Überhitzung und folglich zu Unebenheiten an der nach oben gewölbten Schmelzfläche.
	Multispot Contouring und deren Prozessparameter Focus Offset, Beam Current, Overlap time, Spot Time & Number of Spots	(Wang et al. 2018b)	Arcam A2X / Ti6Al4V	Konturlinien mit einem Spot erzeugen niedrigere Rauheiten. Durch mehrere Schmelzpunkte steigt die Rauheit. Beides ist jeweils von weiteren anpassbaren Prozessparametern für die ein- oder mehrpunkt Konturlinie abhängig.

Tabelle 16 Auswirkungen von EBM-Prozessparameteränderungen auf die Prozessführung und das Herstellergebnis (Fortsetzung)

Funktionen	Untersuchter Teilprozessparameter	Quelle	Anlage / Material	Bemerkungen
Current Compensation	-	-	-	-
Speed-Function	Erhöhung des Faktors	(Price et al. 2014; Shrestha und Chou 2017; Cheng und Chou 2017)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Mit steigendem Faktor steigt die Rauheit der Oberfläche. Ab 50 steigt die Rauheit stärker an, da an der Oberfläche Poren entstanden.
	Verringerung des Faktors (36; 30; 18; 12)	(Tamas-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Mit abfallendem Faktor vom Ausgangswert 36 verringert sich die Porosität im Bauteil.
	Erhöhung und Verringerung des Faktors (10 - 152)	(Cunningham et al. 2016)	Arcam A2 / Ti6Al4V	Der Faktor hat Einfluss auf die Porosität. Werte über 36 erhöhen ohne Änderung weiterer Parameter die Porosität, wohingegen bei geringeren Faktoren die Porosität geringer wird.
	Speed Function (60; 120; 180)	(Gong 2013)	Arcam S400 / Ti6Al4V	Mit steigender Speed Function erhöht sich die Porosität.
	Speed Function (75; 98; 120)	(Sun 2016)	Arcam A1 / Ti6Al4V	Die Verringerung vom Standardwert reduziert die Porosität. Erhöhungen steigern diese, was nicht mit multiplen Schmelzen verhindert werden kann.
	Speed Function (2; 4; 8; 10; 19)	(Al-Bermani 2011)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Eine Steigerung erhöht die Geschwindigkeit, mit welcher der Strahl verfährt. Dieser Anstieg ist durch Änderung des Strahlstroms zu kompensieren.
Thickness-Function	Thickness-Function auf 50 %	(Karlsson Algardh et al. 2016)	Arcam A2 / Ti6Al4V	Änderung des Faktors ermöglicht die Prozessierung der Schichtdicke von 25 µm.
Turning-Point-Function	Turning-Point-Function abgeschaltet	(Tamas-Williams et al. 2015)	Arcam S12 / Ti6Al4V	Dies führt zu geringerer Porosität verglichen mit Standardthema.

A-4 Ursache-Wirkungs-Diagramm für das Elektronenstrahlschmelzen

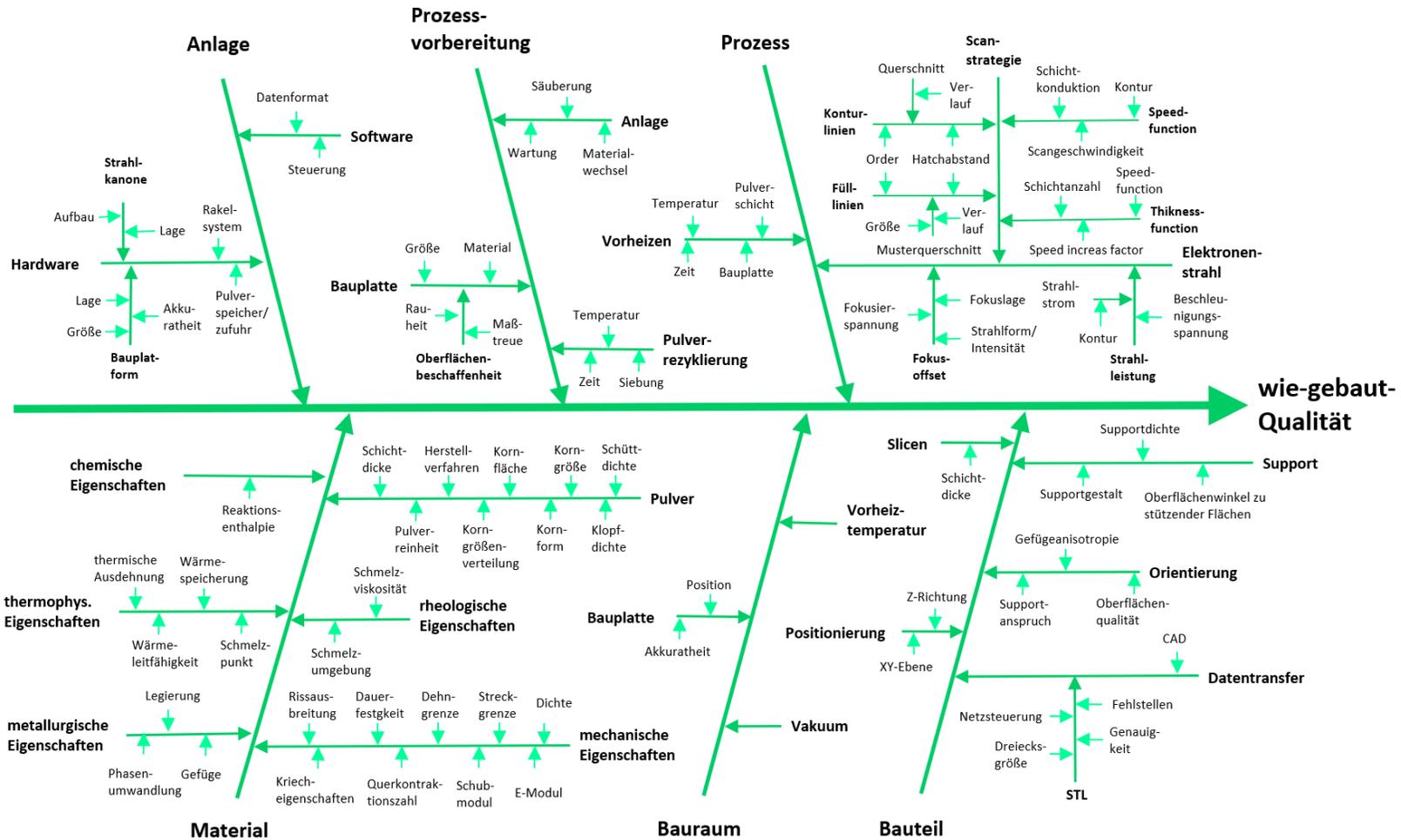


Abbildung 64 Ursache-Wirkungs-Diagramm des Elektronenstrahlschmelzens

A-5 Konstruktionsmethodik für die additive Fertigung

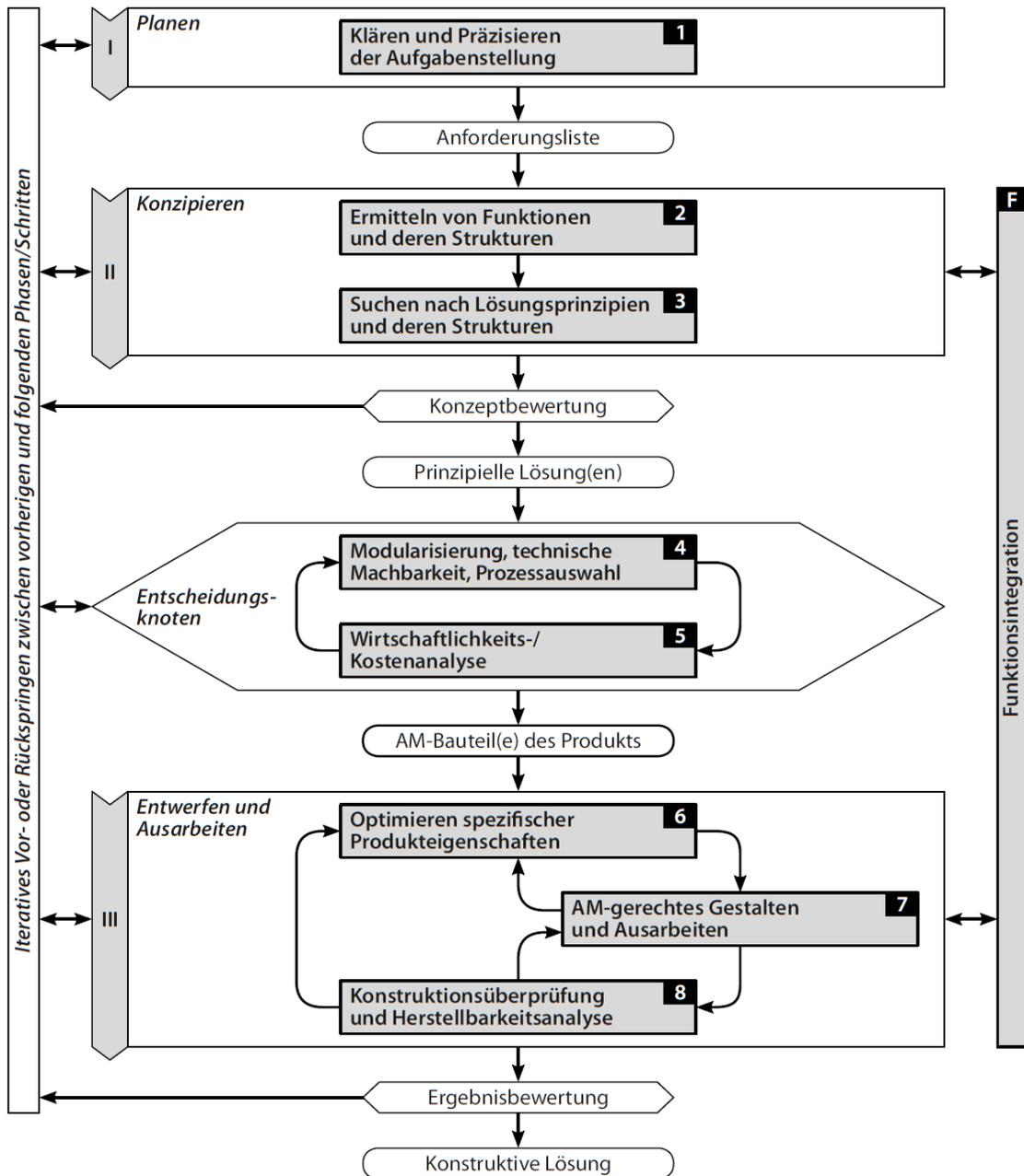


Abbildung 65 Vorgehensmodell zur Lösungsfindung additiver Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben (Kumke 2018)

A-6 Recherche zu Leichtbaupotenzialen bei metallbasierten AF-Verfahren

Tabelle 17 Übersicht zu Leichtbaupotenzialen durch eine Strukturoptimierung für die additive Fertigung

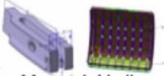
Bauteil	Gewicht [g]			Spannungen [MPa]			Verschiebungen [mm]			Prozess	Quelle
	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz		
	222	140	-37 %	162	173	7 %	0,106	0,106	0 %	LBM	(Reiher und Koch 2016)
	1114	456	-59 %	-	-	-	0,076	0,048	-37 %	LBM	(Reiher und Koch 2016)
	1090	380	-65 %	-	-	-	-	-	-	EBM	(Huang et al. 2016)
	60	40	-33 %	-	-	-	-	-	-	EBM	(Huang et al. 2016)
	918	326	-64 %	800	400	-50 %	-	-	-	LBM	(Tomlin und Meyer 2011)
	800	400	-50 %	-	-	-	-	-	-	LBM	(Huang et al. 2016)

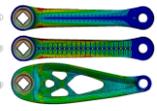
Tabelle 17 Übersicht zu Leichtbaupotenzialen durch Strukturoptimierung für die additive Fertigung (Fortsetzung)

Bauteil	Gewicht [g]			Spannungen [MPa]			Verschiebungen [mm]			Prozess	Quelle
	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz		
Herstellung 	138	111	-20 %	77	28	-64 %	-	-	-	LBM	(Faskhutdinov et al. 2017)
	-	-	-28 %	300	250	-17 %	-	-	-	LBM	(Seabra et al. 2016)
	832	536	-36 %	474	265	-44 %	0,25	0,32	28 %	EBM	(Walton und Moztarzadeh 2017)
	380	215	-43 %	107	91	-15 %	-	-	-	EBM	(Yoder et al. 2017)
	380	258	-32 %	107	123	15 %	-	-	-	EBM	(Yoder et al. 2017)
	380	235	-38 %	107	116	8 %	-	-	-	EBM	(Yoder et al. 2017)
	380	227	-40 %	107	60	-44 %	-	-	-	EBM	(Yoder et al. 2017)

Tabelle 17 Übersicht zu Leichtbaupotenzialen durch Strukturoptimierung für die additive Fertigung (Fortsetzung)

Bauteil	Gewicht [g]			Spannungen [MPa]			Verschiebungen [mm]			Prozess	Quelle
	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz		
	259	212	-18 %	750	290	61 %	4	1,36	-66 %	LBM	(Kranz 2017)
	226	196	-13 %	400	800	100 %	0,29	0,26	-10 %	LBM	(Kranz 2017)
	225	175	-22 %	400	450	13 %	0,29	0,23	-21 %	LBM & EBM	(Süß et al. 2018c)
	225	139	-38 %	400	520	30 %	0,29	0,3	3 %	LBM & EBM	(Süß et al. 2018c)
	225	57	-75 %	400	900	125 %	0,29	0,48	66 %	LBM & EBM	(Süß et al. 2018c)
	225	57	-75 %	400	470	18 %	0,29	0,4	38 %	LBM & EBM	(Süß et al. 2018c)

Tabelle 17 Übersicht zu Leichtbaupotenzialen durch Strukturoptimierung für die additive Fertigung (Fortsetzung)

Bauteil	Gewicht [g]			Spannungen [MPa]			Verschiebungen [mm]			Prozess	Quelle
	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz	Konventionell	Additiv	Relative Differenz		
Herstellung										LBM/ EBM	
	2649	1615	-39 %	912	921	1 %	-	-	-	EBM	(Süß 2015)
	217,5	88	-60 %	211	240	14 %	2,69	1,79	-33 %	LBM	(Lippert 2018)
Mittelwert der Gewichtsreduktion aller Optimierungen			-42 %								
Mittelwert der Gewichtsreduktion aller Optimierungen mit erhöhter Steifigkeit			-35 %								

A-7 Grundregeln der Konstruktion für metalladditive Herstellverfahren

Tabelle 18 Regeln zur Konstruktion für metalladditive Fertigungsverfahren (nach Zäh 2006)

Anforderungen/ Restriktionen	Konsequenzen für die Konstruktion
Einfluss des Treppenstufeneffekts auf die Oberflächenqualität	Spitzwinklige Ebenen zur Bauplattform sind zu vermeiden. Bohrungen und Rundungen sollten in Baurichtung liegen. Die Bauteillage ist zu beachten.
Schichtdickeneinfluss auf die Oberflächenqualität	Hohe Oberflächenqualität sollte nicht gefordert werden, wo diese nicht notwendig ist.
Korngröße	Die Korngröße beeinflusst die minimal mögliche Schichtdicke und damit die Oberflächenqualität.
Nachbearbeitung von Funktionsflächen	Zugänglichkeit und Anforderungen des Nachbearbeitungsverfahrens sind zu beachten. Folglich sollten Aufmaß eingeplant und Fixpunkte zur Nachbearbeitung eingebracht werden.
Abgeschlossene Hohlräume	Zugänglichkeiten zum Entfernen des nicht verfestigten Materials in Hohlräumen sind zu gewährleisten.
Stützkonstruktion	Zugänglichkeit zum Entfernen der Stützkonstruktionen ist vorzusehen. Überhänge sollten vermieden werden.
Infiltration bei Zweiprozessverfahren	Nachbearbeitung des überschüssigen Materials nach der Infiltration ist zu ermöglichen.
Schwimmende Schichten	Abstützungen an der Bauplattform oder an bereits verfestigten Bauteilbereichen sind zu berücksichtigen.
Verzug von großen, horizontal liegenden Schichten	Anordnungen des Bauteils im Bauraum um ca. 4° gegenüber der Horizontalen wählen, um eine Verformung der Schicht zu vermeiden. Der Treppenstufeneffekt ist zu beachten.
Festigkeitswerte sind richtungsabhängig und in XY-Ebene am höchsten	Späterer Kraftfluss des eingesetzten Bauteils ist schon bei der Planung zu beachten.
Oberflächenqualität von Downskin-Flächen	Oberflächen mit hohen Qualitätsanforderungen sollten nach oben orientiert gebaut werden.

A-8 Einordnung der Untersuchungen zu herstellbaren Geometrien

Tabelle 19 Verfahrensbezogene Einordnung von Literaturergebnissen zu geometriebezogenen Untersuchungen beim LBM und EBM

Gliederungsteil			Quellen	
Hauptprozessschritt	Grundelemente	Featureebene	LBM	EBM
Gestaltung	Allgemeine Bauteilgröße	Abmessungen	(Trenke 2000; Kranz 2017; Kranz et al. 2015)	-
		Integration der Bauplatte	(Kranz 2017)	-
		Maßgenauigkeit	(Weaver et al. 2018; Lieneke et al. 2015; Lieneke et al. 2016; Kranz 2017)	(Dolimont et al. 2015)
		Kantenauflösung	(Kranz 2017)	-
	Allgemeine Bauteilform	Materialanhäufung	(Kranz 2017; Kranz et al. 2015)	-
		Strukturübergänge	(Adam und Zimmer 2014; Kranz 2017)	-
	Hohlräume	Gestaltung	(Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	-
		Pulverentfernung	(Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	(Dehoff et al. 2016)
	Radien und Rundungen	Übergangsradien	(Thomas 2009; Kranz 2017)	-
		Orientierung	(Thomas 2009; Kranz 2017)	-
	Wandungen	Wandstärke	(Thomas 2009; Trenke 2000; Adam und Zimmer 2014; Kranz 2017)	(Finzel 2016; Vayre et al. 2013)
		Aspektverhältnis gerader Wandungen	(Kranz 2017)	-
		Anbindung	(Kranz 2017)	-

Tabelle 19 Verfahrensbezogene Einordnung von Literaturergebnissen zu geometriebezogenen Untersuchungen beim LBM und EBM (Fortsetzung)

Gliederungsteil			Quellen	
Hauptprozessschritt	Grundelemente	Featureebene	LBM	EBM
Gestaltung	Bohrungen	Bohrungstypen	(Thomas 2009; Adam und Zimmer 2015; Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	-
		Orientierung	(Adam und Zimmer 2015; Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	(Ameen et al. 2018a)
		Größe	(Thomas 2009; Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	(Ameen et al. 2018a)
	Balken	Zylindrisch	(Kranz 2017)	-
		Rechteckig	(Kranz 2017)	-
	Spalte	Form	(Kranz 2017)	-
		Minimale Abmessungen	(Thomas 2009; Adam und Zimmer 2014; Kranz 2017, 2017)	-
	Überhänge		(Trenke 2000; Thomas 2009; Adam und Zimmer 2014; Spiering et al. 2018; Patterson et al. 2017)	(Grandvallet et al. 2018)
	Gitterstrukturen		(Lippert 2018; Kranz 2017)	(Zhang et al. 2018)
	Supportstrukturen	Bauteilanbindung	(Kranz 2017; Spiering et al. 2018; DIN EN ISO 52911-1)	-
		Kritischer Überhangwinkel	(Trenke 2000; Adam und Zimmer 2014; Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	(Grandvallet et al. 2018)
		Zugänglichkeit	(Kranz 2017)	-

Tabelle 19 Verfahrensbezogene Einordnung von Literaturergebnissen zu geometriebezogenen Untersuchungen beim LBM und EBM (Fortsetzung)

Gliederungsteil			Quellen	
Hauptprozessschritt	Grundelemente	Featureebene	LBM	EBM
Endbearbeitung	Allgemein	Übermaß	(Trenke 2000; Kranz 2017)	-
		Bearbeitungsflächen	(Thomas 2009; Kranz 2017)	-
		Einspannstellen	(Kranz 2017)	-
	Mechanische Nachbearbeitung	Drehen	(Kranz 2017)	-
		Fräsen	(Kranz 2017)	(Alexander et al. 2016)
		Bohren	(Thomas 2009; Kranz 2017)	-
	Oberflächenqualität	Notwendigkeit der Nachbearbeitung	(Thomas 2009; Kranz 2017)	Vgl. Abschnitt 2.2.3
Planung des Bauzyklusses	Bauteilorientierung	Oberflächen	(Thomas 2009; Kranz 2017)	Vgl. Abschnitt 2.2.2.1
		Überhänge	(Kranz 2017)	-
		Aufbauhöhe	(Kranz 2017)	-
		Aufwand Abtrennung	(Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	-
		Beschichter	(Thomas 2009; Kranz 2017; DIN EN ISO 52911-1)	-

A-9 Recherchen zu Rauheiten des EBM

Tabelle 20 Rauheitswerte für EBM und Ti6Al4V in Abhängigkeit der Messmethode an Oberflächenwinkeln $\nu = \delta = 90^\circ$

Rau- heit	Messmethode			Quellen
	Taktil	Optisch	Volumentomografisch	
Arithmetischer Mittelwert der Rauheit R_a (μm)	17; 20; 15	30; 28; 27; 38; 26; 35	-	(Karlsson 2015)
	-	29,53; 25,07; 31,47; 27,90; 28,33; 26,81; 28,78; 27,26	-	(Dolimont et al. 2015)
	-	31	-	(Mohammad et al. 2016b)
	-	-	33	(Wang et al. 2016b)
	31,7; 31,0	-	-	(Wang et al. 2017b)
	-	-	44	(Persenot et al. 2018b)
	16,29	-	-	(Sato et al. 2016)
	-	-	40; 46; 47,9; 31,4	(Suard 2015)
	-	13	-	(Weißmann et al. 2017)
	31,21	38,9	-	(Sun 2016)
	28,1; 31,2	-	-	(Al-Bermani 2011)
	-	27,86	-	(Dolimont et al. 2016)
	-	-	32; 34	(Pérez-Sánchez et al. 2018)
	-	22,24; 17,94; 21,08; 25,93; 23,99	-	(Finzel 2016)
	-	-	44	(Persenot et al. 2018a)
	-	24,7	-	(Nutal et al. 2018)
24,61	27,32	38,05	Mittelwert	

Tabelle 20 Rauheitswerte für EBM und Ti6Al4V in Abhängigkeit der Messmethode an Oberflächenwinkeln $\nu = \delta = 90^\circ$ (Fortsetzung)

Rau- heit	Messmethode			Quelle
	Taktil	Optisch	Volumentomografisch	
Mittlere Rautiefe R_z (μm)	83,53	-	-	(Sato et al. 2016)
	-	62	-	(Weißmann et al. 2017)
	162,36	209,5	-	(Sun 2016)
	71	-	-	(Fousová et al. 2018)
	105,36	135,75	-	Mittelwert
Maximale Rautiefe R_t (μm)	-	-	378	(Persenot et al. 2018b)
	-	-	212; 247; 265; 199,2	(Suard 2015)
	-	212,77	-	(Dolimont et al. 2016)
	-	-	175; 178	(Pérez-Sánchez et al. 2018)
	-	150,34	-	(Finzel 2016)
	-	-	390	(Persenot et al. 2018a)
	-	181,56	254,17	Mittelwert

Tabelle 20 Rauheitswerte für EBM und Ti6Al4V in Abhängigkeit der Messmethode an Oberflächenwinkeln $\nu = \delta = 90^\circ$ (Fortsetzung)

Rauheit	Messmethode			Quelle
	Taktil	Optisch	Volumentomografisch	
Mittlere Flächenrauhheit S_a (μm)	-	23; 22; 25; 41;	-	(Ackelid 2010)
	-	54,8	-	(Sidambe 2017)
	-	40	-	(Nutal et al. 2018)
	-	45,7	-	(Zhai et al. 2016)
	-	20,46	-	(Muzangaza 2018)
	-	34,00	-	Mittelwert
Maximale Flächenrautiefe S_z (μm)	-	167; 157; 166; 302	-	(Ackelid 2010)
	-	751	-	(Sidambe 2017)
	-	337	-	(Zhai et al. 2016)
	-	232,9	-	(Muzangaza 2018)
	-	301,84	-	Mittelwert

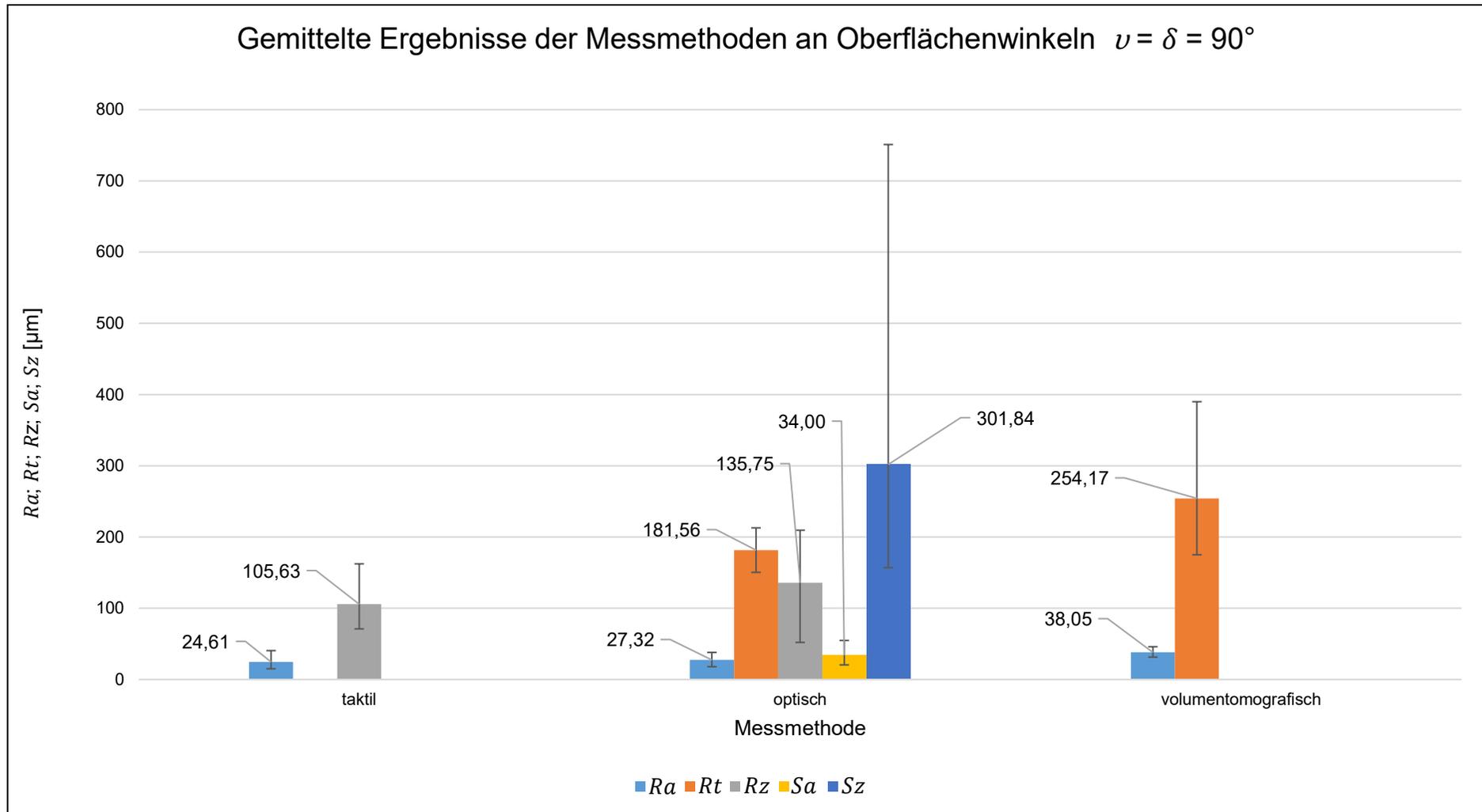


Abbildung 66 Zusammenfassung der Rauheiten für Oberflächenwinkel $\nu = \delta = 90^\circ$ in Abhängigkeit der Messmethode

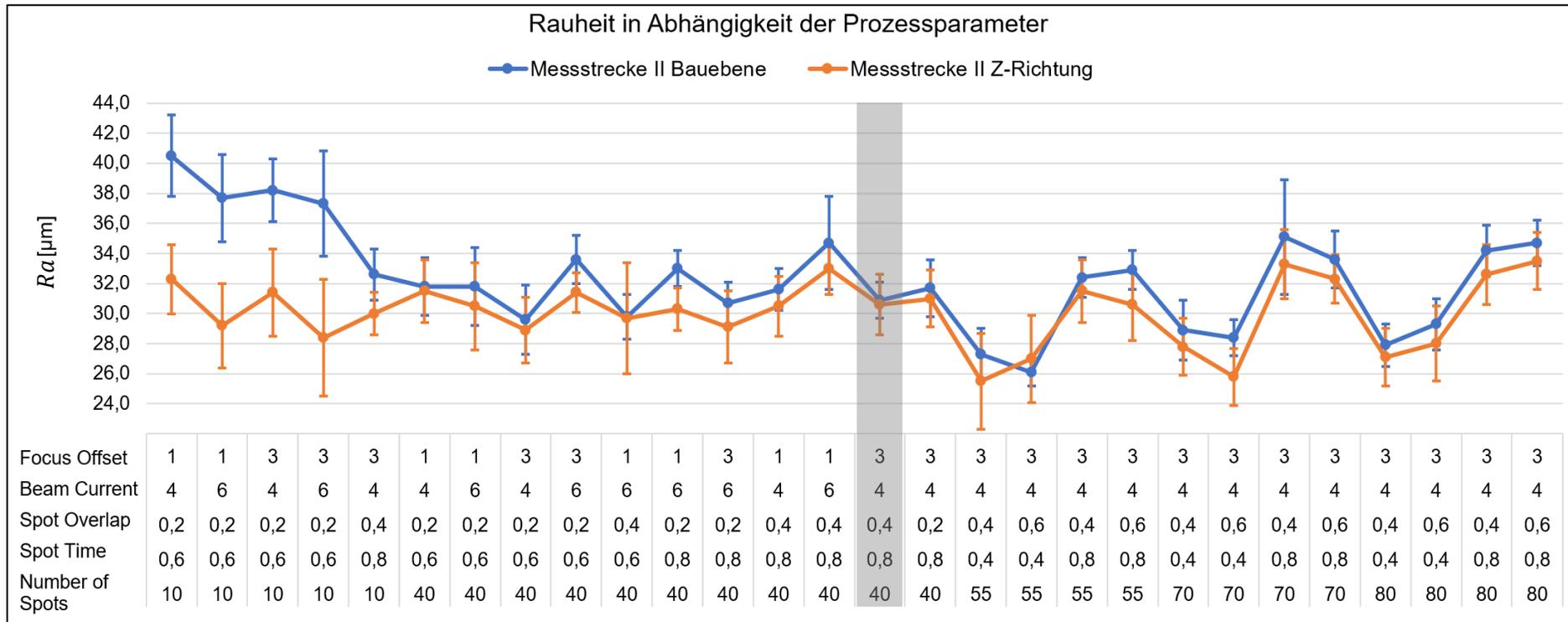


Abbildung 67 Einfluss der Prozessparameter und Messrichtung auf die Rauheit sowie Darstellung der Standardparameter des Anlagenherstellers (grau) (Eigene Darstellung nach Wang et al. 2017b)

Tabelle 21 Oberflächenwinkelabhängige Rauheitswerte

Winkel	$v = 0^\circ$	$v = 25^\circ$	$v = 30^\circ$	$v = 35^\circ$	$v = 40^\circ$	$v = 45^\circ$	$v = 50^\circ$	$v = 55^\circ$	$v = 60^\circ$	$v = 80^\circ$
Ra (μm) (taktil)	5	13,5	15	15	19	18	20	25,5	27,5	-
Rt (μm) (volumetomografisch)	11	-	-	-	-	32,4	-	-	-	-
Quelle	(Mohammad et al. 2016a; Persenot et al. 2018a)	(Grandvallet et al. 2018)				(Grandvallet et al. 2018; Persenot et al. 2018a)	(Grandvallet et al. 2018)			-
Winkel	$v = \delta = 90^\circ$	$\delta = 60^\circ$	$\delta = 55^\circ$	$\delta = 50^\circ$	$\delta = 45^\circ$	$\delta = 40^\circ$	$\delta = 35^\circ$	$\delta = 30^\circ$	$\delta = 20^\circ$	$\delta = 0^\circ$
Ra (μm) (taktil)	30,67	-	26,5	27	22,5	21,5	19	15	-	-
Rt (μm) (volumetomografisch)	39,34	-			42,3				-	56,30
Quelle	Tabelle 20	-	(Grandvallet et al. 2018)	(Grandvallet et al. 2018; Persenot et al. 2018a)	(Grandvallet et al. 2018)					(Persenot et al. 2018a)

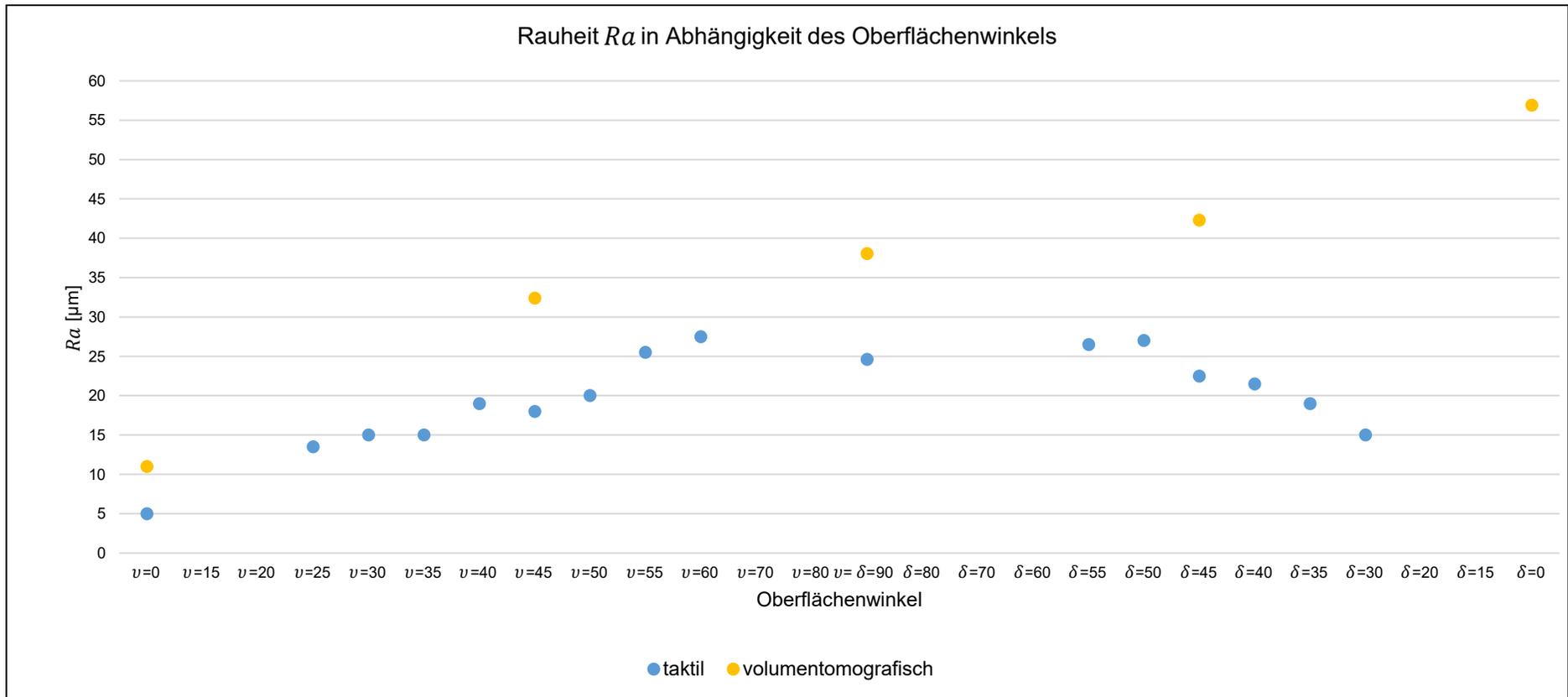


Abbildung 68 Einfluss des Oberflächenwinkels auf die Rauheit (Grandvallet et al. 2018; Mohammad et al. 2016b; Persenot et al. 2018a)

A-10 Kostenberechnung der laserbasierten Bauteilfertigung

$$K = \frac{1}{N} \cdot (K_M + K_F) \quad (A-10.1)$$

$$K_M = k_S \cdot k_r \cdot N \cdot C_m \cdot V \cdot \rho \cdot 0,000001 \quad (A-10.2)$$

$$K_F = K_{BP} + K_{VB} + K_{NB} + K_{QS} \quad (A-10.3)$$

$$K_{VB} \cong K_L = C_L \cdot T_L \quad (A-10.4)$$

$$K_{BP} = \frac{T_b}{P_{Anlage}} \cdot \left(\frac{K_{Invest}}{t_{Nutz,Anlage}} + K_{Service} + K_{Energie} + K_{Raum} \right) + T_b \cdot \left(\frac{K_{Invest,Filter}}{t_{Nutz,Filter}} + K_{Gas} \right) + K_{VM,sonst} \quad (A-10.5)$$

$$T_b = T_S + T_B + T_D = \frac{H \cdot (t_B + t_D)}{3600 \cdot s_d} + \frac{N \cdot V}{1000 \cdot \dot{S}} \quad (A-10.6)$$

$$N_{Ebene} = N_x \cdot N_y = \left(\frac{PL_x + g_x - (2 \cdot PL_{xa})}{BR_x + g_x} \right) \cdot \left(\frac{PL_y + g_y - (2 \cdot PL_{ya})}{BR_y + g_y} \right) \quad (A-10.7)$$

Abbildung 69 Berechnungsgrundlagen der Bauteilkosten beim Laserstrahlschmelzen (Kranz 2017; Yim und Rosen 2012a; Gibson et al. 2014; VDMA 34160; Feldhusen und Grote 2013)

Tabelle 22 Beschreibung der an der Kostenberechnung beteiligten Größen

Symbolik	Beschreibung
K	Herstellkosten pro Bauteil
K_M	Materialkosten
K_F	Fertigungskosten
N	Anzahl an Bauteilen
k_s	Faktor zur Stützstrukturberücksichtigung
k_r	Faktor zur Berücksichtigung des nicht rezyklierbaren Pulvers
C_m	Gewichtsbezogene Materialkosten
V	Bauteilvolumen
ρ	Dichte des Werkstoffes
K_{BP}	Kosten des Bauprozesses
K_{VB}	Kosten für die Bauprozessvorbereitung
K_{NB}	Kosten für die Nachbearbeitung
K_{QS}	Kosten für die Qualitätssicherung
K_L	Lohnkosten
C_L	Lohnkostenpauschale pro Zeiteinheit
T_L	Arbeitszeit
T_b	Dauer des Bauprozesses
P_{Anlage}	Dauer der Maschinennutzung pro Jahr
K_{Invest}	Anschaffungskosten
$t_{Nutz\ Anlage}$	Abschreibungsdauer
$K_{Service}$	Kosten für Service und Wartung
$K_{Energie}$	Energiekosten
K_{Raum}	Kosten für die Raumnutzung
$K_{Invest\ Filter}$	Kosten für den Filter
$t_{Nutz\ Filter}$	Lebensdauer des Filters
K_{Gas}	Kosten für den Schutzgasverbrauch pro Stunde
$K_{VM\ sonst}$	Kosten sonstiger Verbrauchsmittel
T_S	Gesamtzeit für die Belichtung der Schmelzflächen
T_B	Gesamtzeit für die Pulverbeschichtung
T_D	Gesamtzeit für die steuerungsbedingten Verzögerungen
H	Höhe des gesamten Bauprozesses
t_B	Zeit für die Pulverbeschichtung pro Schicht
t_D	Zeit für die steuerungsbedingten Verzögerungen pro Schicht
\dot{S}	Schmelzrate
N_{Ebene}	Anzahl an Bauteilen in der XY-Ebene
BR_X	Abmessung des Begrenzungsraums entlang der X-Richtung
BR_Y	Abmessung des Begrenzungsraums entlang der Y-Richtung
PL_X	Maß der Bauplatte in X-Richtung
PL_Y	Maß der Bauplatte in Y-Richtung
PL_{Xa}	Sicherheitsabstand zur nutzbaren Bauplattengröße in X-Richtung
PL_{Ya}	Sicherheitsabstand zur nutzbaren Bauplattengröße in Y-Richtung
g_X	Abstand zwischen den Bauteilen in X-Richtung
g_Y	Abstand zwischen den Bauteilen in Y-Richtung

A-11 Validierung der Potenzialabschätzung

Tabelle 23 Ergebnisse der Potenzialberechnung anhand ausgewählter Beispiele im Vergleich zur erfahrungsbasierten, subjektiven Bewertung

Bauteil	Potenzialberechnung				Geometrie				Materialausnutzung		Werkstoff		Bewertung		Ranking	
	Volumen [mm ³]	Oberfläche (A ₀) [mm ²]	Funktionsfläche (A _F) [mm ²]	G _F = A _F /A ₀	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Materialausnutzung/ -effizienz	Dichte alter Werkstoff [g/cm ³]	Dehngrenze alter Werkstoff [MPa]	Wertung (ohne Wichtung)	Wertung (mit Wichtung)	Ranking Potenzialabschätzung	Ranking subjektiv		
	36605,76	19075,54	5166,04	0,271	158	32	27	3,7	2,7	407	60%	63 %	6	6		
	314054,58	105524,5	48759,1	0,462	327	115	73	8,7	2,7	407	53%	56 %	9	7		
	11208,07	6800,53	4498,73	0,662	67	24	17	2,4	7,85	1176	36%	41 %	12	11		
	23012,51	8908,53	4332,89	0,486	36	40	70	4,4	7,76	700	53%	58 %	7	9		
	52630,13	20564,24	9017,31	0,438	127	68	56	9,2	2,7	407	54%	57 %	8	5		
	32740,86	17979,36	10290,8	0,572	41	110	49	6,7	7,85	900	42%	48 %	10	10		
	33121,38	28205,44	6611,75	0,234	100	221	28	18,7	7,85	1176	67%	70 %	4	12		
	56588,07	25796,77	6236,09	0,242	42	173	43	5,5	2,7	220	66%	71 %	3	3		
	65896,71	34185,38	7243,03	0,212	100	77	123	14,4	2,7	220	72%	76 %	2	1		
	40316,96	18669,22	5557,46	0,298	26	161	68	7,1	2,7	140	62%	67 %	5	2		
	8400,88	8146,45	1411,62	0,173	22	173	22	10,0	2,7	140	73%	77 %	1	4		
	3582,55	3048,52	1699,91	0,558	14	36	13	1,8	7,85	600	39%	45 %	11	8		

A-12 Kostenstruktur des EBM

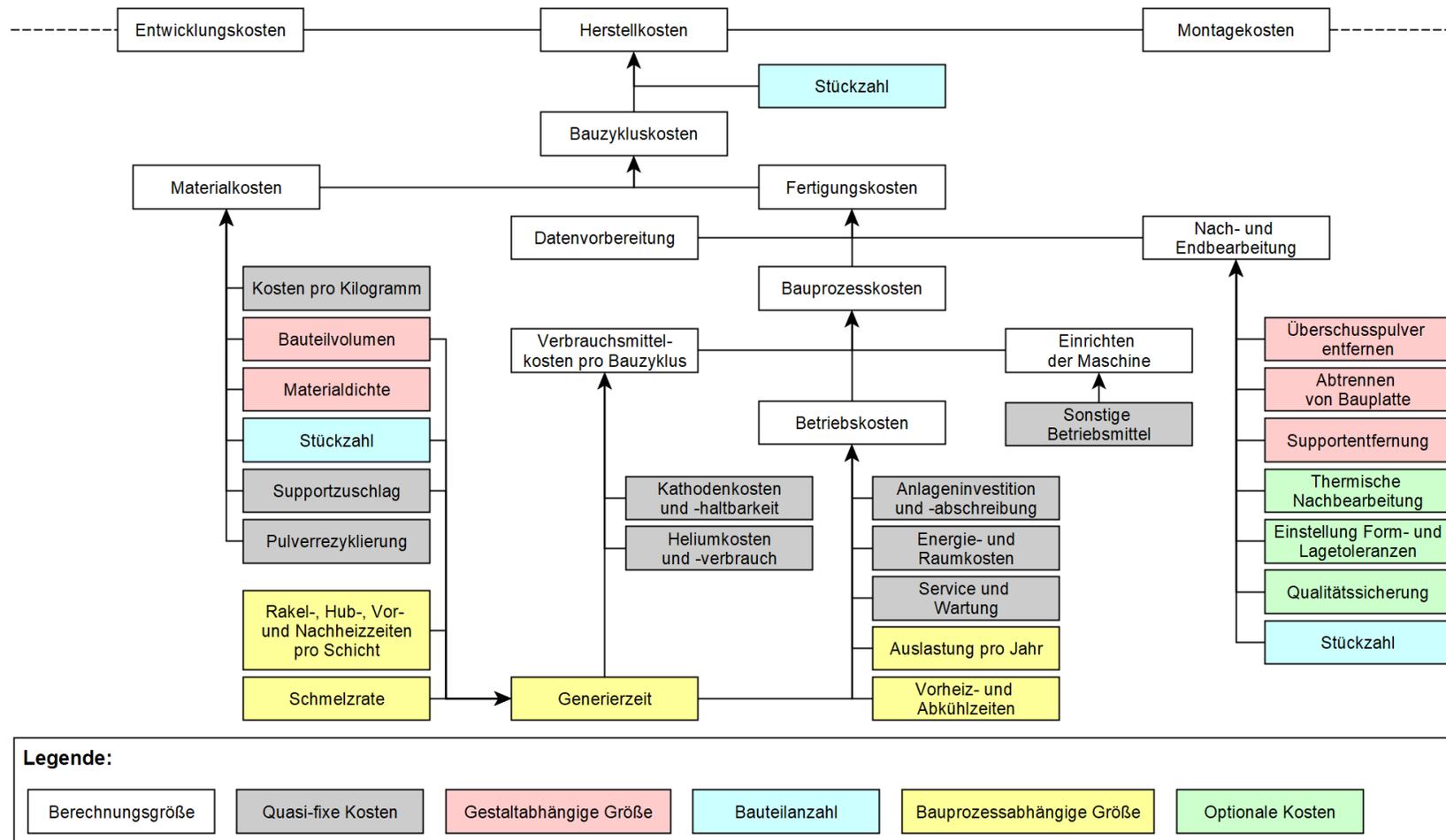


Abbildung 70 Kostenstruktur des EBM

Tabelle 24 Werte und Annahmen zur Kostenermittlung des EBM

Eingangsgröße	Wert	Quellen
Schmelzrate \dot{S}	60 cm ³ /h	Schätzwert (vgl. Tabelle 13 in Anlage A-1, S. 170)
Schichtdicke	0,05 mm (A2X) 0,09 mm (Q20plus)	Herstellerangaben
Bauraum [mm]	200 × 200 × 380 (A2X) Ø350 × 380 (Q20plus)	Herstellerangaben
Abstand zum Bauraumrand	10 mm	Erfahrungswert
Abstand zu benachbarten Bauteilen einer Schicht	5 mm	Erfahrungswert
Abstand gestapelter Bauteile	10 mm	Abschnitt 4.6
Anteil Mehrpulver k_r	1,05	Erfahrungswert
Anteil Supportmaterial k_s	1,166	Festlegung
Dauer der Anlagennutzung pro Jahr T_{Jahr}	2000 h	Erfahrungswert
Investitionskosten der Anlage und Peripherie K_{Anlage}	700000 € (A2X) 800000 € (Q20plus)	(Wohlers 2018)
Dauer der Abschreibungsjahre t_{Anlage}	5 Jahre	Annahme
Kosten für Service und Wartung pro Jahr $K_{Service}$	30000 €/Jahr	Schätzwert
Kosten für Energie pro Jahr $K_{Energie}$	1000 €/Jahr	Gleichung (3.13), S. 56
Raumkosten pro Jahr K_{Raum}	4500 €/Jahr	Schätzwert
Kosten für die Kathode $K_{Kathode}$	76 € (A2X) 1355 € (Q20plus)	Hersteller (Stand 2018)

Tabelle 24 Werte und Annahmen zur Kostenermittlung (Fortsetzung)

Eingangsgröße	Wert	Quelle
Lebensdauer der Kathode $t_{Kathode}$	50 h (A2X) 500 h (Q20plus)	Erfahrungswert
Kosten für Helium im Bauprozess K_{HeP} und zum Abkühlen K_{HeK}	10 €/l	Schätzwert
Menge des eingeleiteten Heliums im Prozess M_{HeP}	1 l/h	Tabelle 13, Anlage A-1, S. 170
Menge des eingeleiteten Heliums zum Abkühlen M_{HeK}	0 l/h	Optional
Kosten für sonstige Verbrauchs- und Betriebsmittel pro Bauzyklus $K_{sonstige}$	50 €	Schätzwert
Lohnkosten für <ul style="list-style-type: none"> • Techniker • Konstruktion & Software 	60 €/h 120 €/h	Schätzwert Schätzwert
Datenvorbereitung	60 min	Schätzwert
Vor- und Nachbereitung der Anlage	30 min	Schätzwert
Nachbearbeitung pro Bauteil (Pulverstrahlen und Support entfernen)	15 min	Schätzwert
Beschichtungsdauer pro Schicht t_B	3 s	Auswertung der Maschinendaten
Verzögerung je Schicht t_D	2 s	Auswertung der Maschinendaten
Vorheizzeit je Schicht t_V	0,5 ms/mm ²	Schätzwert und Auswertung der Maschinendaten

Tabelle 25 Gesamtkosten der Fallbeispiele aus Abschnitt 5 für die Herstellung mit der A2X

Bauteilbezeichnung	MGB	FSL	FCRC
Geschätztes Volumen [mm ³]	552327	78645,87	34579,7
Anzahl N_{Ziel}	100	100	100
Max. Anzahl an Bauteilen pro Ebene $N_{Ebene,max}$	1	1	2
Max. Anzahl an Bauteilen pro Zyklus N_{Max}	2	3	10
Anzahl notwendiger Bauzyklen	50	34	10
Gesamtzeit eines Bauzyklusses T_b	55,10 h	42,73 h	40,58 h
Gesamtzeit aller Bauzyklen	3005,02 h	1593,54 h	455,81 h
Bauprozesskosten pro Zyklus K_{BP}	6050,73 €	4808,49 €	4593 €
Supportentfernungskosten pro Zyklus K_{SE}	30 €	45 €	150 €
Fertigungskostenanteil pro Zyklus K_F	6083,19 €	4857,02 €	4755 €
Materialkostenanteil pro Zyklus K_M	902,75 €	192,81 €	282,59 €
Bauteilkosten K	<u>≈ 3493 €</u>	<u>≈ 1687 €</u>	<u>≈ 504 €</u>

A-13 Prozessparameter der Versuchsreihen

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Schichtdicke			-	0,09
SmallestContourSize			0,02	0,02
Version			3.2.121	5.0.41
Preheat	Properties	Enable	True	True
		ActiveHeater	True	True
		Focus	UseValue	UseValue
		FocusValue	62	44
		FocusValueHeater	130	100
		MaxAdaptivelterations	-	20
		MaxHeatTime	-	60
		MinHeatCurrent	-	51
		UseEnergyConsumption	True	True
		UsePhdIIIForCurrSlewRate	-	True
Preheat - Box	Properties	Enable	True	True
		AutoCalc	True	True
		FitAllModels	True	True
		LimitMaxSpeed	-	True
		MaxCurrentForBox	48	48
		OffsetToPart	4	4
		Size	144	144

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Preheat - Box - JumpSafe	Properties	Enable	True	True
		UseAdaptiveLineOrder	-	True
	Hatch	ChangeForEachDepth	0,1	0,09
		LineOffset	1,2	0,4
		LineOrder	15	20
	Sweep	HeatLossFactor	1,00E-07	8,00E-06
		MaxCurrent	30	36
		MaximumNumberOfSweeps	25	20
		MeanPower	8	0
		MinCurrent	30	36
		NumberOfRepetitionsFor	1	1
		NumberOfSequences	1	1
		NumberOfSweepsAtMaxCurrent	0	1
		Speed	13000	40500
TotalRepetitionsOfSweep	3	3		

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Preheat - Box - MeltSafe	Properties	Enable	True	True
	Hatch	LineOrder	15	15
		LineOffset	1,2	1,2
		HatchDepth	0,1	0,1
	Sweep	HeatLossFactor	6,00E-06	6,00E-06
		MaxCurrent	38	38
		MaximumNumberOfSweeps	38	38
		MeanPower	10,2	10,2
		MinCurrent	38	38
		NumberOfRepetitions	1	1
		NumberOfSequences	1	1
		NumberOfRepetitionsAtMaxCurrent	1	1
		Speed	14600	14600
		TotalRepitionsOfSweep	3	3
Preheating - Heating	Properties	Enable	True	-
		HeatingBetweenModels	True	False
		MaxHeatTime	12	0
		MeanCurrFraction	1	1
	Heater2	Current	-	48
		Override	-	True

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Melt	Properties	Enable	True	True
Melt - Analyse	Calc1D	Enable	True	True
		ConstH	-	0
		MaxDepthForCurrAdd	-	65
		ScaleCurrAdd	-	True
		SurfaceTemp	850	925
		UseConstH	-	True
	PowerAnalyse	MaxCurrent	12	35
		MaxInc	0,5	0,5
		MinCurrent	12	3
Melt - Contours	Properties	BlockOffset	True	True
		ContourOrder	OuterToInner	InnerToOuter
		ContourSqaureOrder	StartWithContour	EndWithContour
		NumberOfContours	2	3
	ContourOverlap	LengthAtMaxOverlap	50	50
		MaxOverlap	0,4	0,4
		MinOverlap	0,4	0,4
		RandomizeDirection	True	-
		RemdomizeStartPosition	True	-
	DeflectionSlewRate	Enable	True	True
		JumpDistToEnable	25	2
		MaxLength	40	16
		MinLength	2	2
		PropLength	0,35	0,06
		Speed	60000	160000

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Melt - Contours - Inner	Properties	Focus	UseValue	UseValue
	MultiSpotCount	Enable	True	True
		BeamSpeedInSquare	100000	80000
		LineOffsetInSquare	5	15
		MaxSquareDisp	90	8000
		MaxSquareSize	92	150
		MinDistPerSpot	3,5	3
		NumberOfSpots	15	30
		Overlap	0,2	1
		SpotTime	1,3	1
		SquareDispPermmHeight	60	0
UseHeaterForDummySweep	-	True		
Melt - Contours - Inner - Offset	Properties	Offset	0,25	0,18
		ThicknessZ1	False	-
	Beam	Current	10	9
		Focus	3	6
		MaxCurrent	10	9
		Speed	800	550
		SpeedFunction	30	30
Melt - Contours	Outer	Focus	UseValue	UseValue
		NumOfOffsets	1	1

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Melt - Contours - Outer	MultiSpotCount	Enable	True	True
		BeamSpeedInSquare	140000	80000
		LineOffsetInSquare	5	15
		MaxSquareDisp	90	8000
		MaxSquareSize	92	150
		MinDistPerSpot	1,8	3
		NumberOfSpots	40	70
		Overlap	0,2	0,4
		SpotTime	0,8	0,5
		SquareDispPermmHeight	70	0
		UseHeaterForDummySweep	-	True
Melt - Contours - Outer - Offset[0]	Properties	Offset	0,34	0,27
	Beam	Current	4	9
		Focus	3	6
		MaxCurrent	4	9
		Speed	340	500
		SpeedFunction	6	6
Melt - Heating	Properties	Enable	True	True
		MaxHeatTime	55	0
		MeanCurrentFraction	1	1
		UseProcessPower	False	-

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Melt - Squares	Properties	Enable	True	True
		OffsetToContour	0,05	0,05
	Multispot	Enable	True	True
		Spots	50	50
		SpotTime	0,0008	0,0008
		TypeOfMultispot	LineOrder	-
		InternalSpotOverlap	-	0
		SpotOverlap	-	0
	Net	InternalOffset	0,5	0,5
Melt - Squares - Multispot	Dummy	Enable	True	-
		Speed	40000	-
		Hatch - ChangeForEachStep	0,1	-
		Hatch - LineOffset	1,2	-
		LineOrder	20	-
	DeflectionSlewRate	Enable	-	False
Melt - Squares - Order	Properties	MultiSquareOrder	Order	Order
		SquareOrder	Order	Order
Melt - Squares - StartSquare	Properties	BeamCurrentOffsetTime	-	0
		Focus	UseValue	UseValue
		RotatingHatchAnglePerMM	-	750
		Size	350	350
		SplitSquareX	1	1
		SplitSquareY	1	1
		StartHatchAngle	-	13
		UseGridEnableFocus	-	True
		UseRotatingHatch	-	False

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Melt - Squares - StartSquare	Beam	Current	15	15
		Focus	3	45
		MaxCurrent	21	28
		Speed	4530	4530
		SpeedFunction	128	33
	CurrentCompensation	Enable	-	True
		MaxLength	500	500
		MinCurrent	4,5	3,5
		PropK	1	1
		RefCurrent	-	19
		ScanlengthReference	55	45
	Hatch	ChangeForEachStep	0,05	0,09
		LineOffset	0,1	0,22
		LineOrder	1	1
		Snake	True	True
	LineOffsetCompensation	MaxLineOffset	-	0,22
		MinLineOffset	-	0,05
		PropK	-	0,15
		ScanlengthReference	-	5

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Melt - Squares - StartSquare	Thickness	Enable	True	True
		ExponentFactor	1,1	0,7
		Max	4	5
		SpeedFactor	1,7	2,5
		ThicknessFactor	0,25	0,25
	ThicknessFocus	Enable	-	True
		ExponentFactor	-	0,35
		Max	-	7
		SpeedFactor	-	-1,9
		ThicknessFactor	-	0
	TurningPoints	Enable	True	True
		BurningPointCalcSteps	-	10
		BurningPointSpeedReduction	-	30
		BurningPointTime	-	0
		ExpFactor1	0,0004	0,00025
		MinNumberOfPointsPerSpeedChange	2	2
		PreExpFactor	0,9	0,9
SpeedAccuracy		4	4	
TimeConst	2	4		

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
Melt - Squares - StartSquare - Optimise	MultiRegionScan	Enable	-	True
		AcceptedThreshold	-	10
		LongScanLinePenalty	-	4
		OptimalHatchLength	-	60
		RegionRotation - Enable	-	True
		RegionRotation - AngleIterations	-	3
		RegionRotation - AngleStep	-	6,7
		RegionRotation - MaxScanLength	-	80
		ScanlengthEqualization - Enable	-	True
		ScanlengthEqualization - StaticCurrent	-	28
		ScanlengthEqualization - UseStaticCurrent	-	True
		ScanlengthEqualization - UseStaticFocus	-	False
		SmallLengthCompensation - MaxLength	-	5
		SmallLengthCompensation - MinLength	-	2
		SmallLengthCompensation - Multiplier	-	0
		SplitRegions	-	True
		SplitRegionsLineCount	-	100
		SplitRegionsOverlap	-	5
	Stepsize	-	5	
Rotation	Enable	-	True	
	IterationAngle	-	5	
	Iterations	-	2	
Melt - Squares - StartSquare - SpeedCompensation	Properties	Enable	-	False
		MaxLength	500	500
		MinSpeed	700	700
		ScanlengthReference	55	45

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
WaferSupport	Properties	Enable	True	True
		Current	5	10
		Focus	UseValue	UseValue
		FocusValue	4	9
		Speed	1400	1950
	DeflectionSlewRate	Enable	True	False
		JumpDistToEnable	2	350
		MaxLength	40	40
		MinLength	2	2
		PropLength	0,4	0,4
		Speed	50000	50000
	Heating	Enable	True	False
		MaxHeatTime	55	0
		MeanCurrFraction	1	1
		UseProcessPower	False	-

Tabelle 26 Prozessparameter der Versuchsreihen zur Untersuchung der herstellbaren Geometrien (Fortsetzung)

Hauptprozess	Unterprozess	Parameter	A2X	Q20plus
WaferSupport	MultiSpotCount	Enable	False	True
		BeamSpeedInSquare	140000	140000
		LineOffsetInSquare	5	5
		MaxSquareDisp	90	95
		MaxSquareSize	92	200
		MinDistPerSpot	3,2	3,2
		NumberOfSpots	30	30
		Overlap	0,3	1,8
		SpotTime	1	1,6
		SquareDispPermmHeight	70	12
		SquareOverlap	0	0,3
		UseHeaterForDummySweep	-	True
	Repititions	BackAndForth	False	True
		MinDist	0,5	0,9
		Repititions	2	2

A-14 Abweichungen der Bauraumdemonstratoren

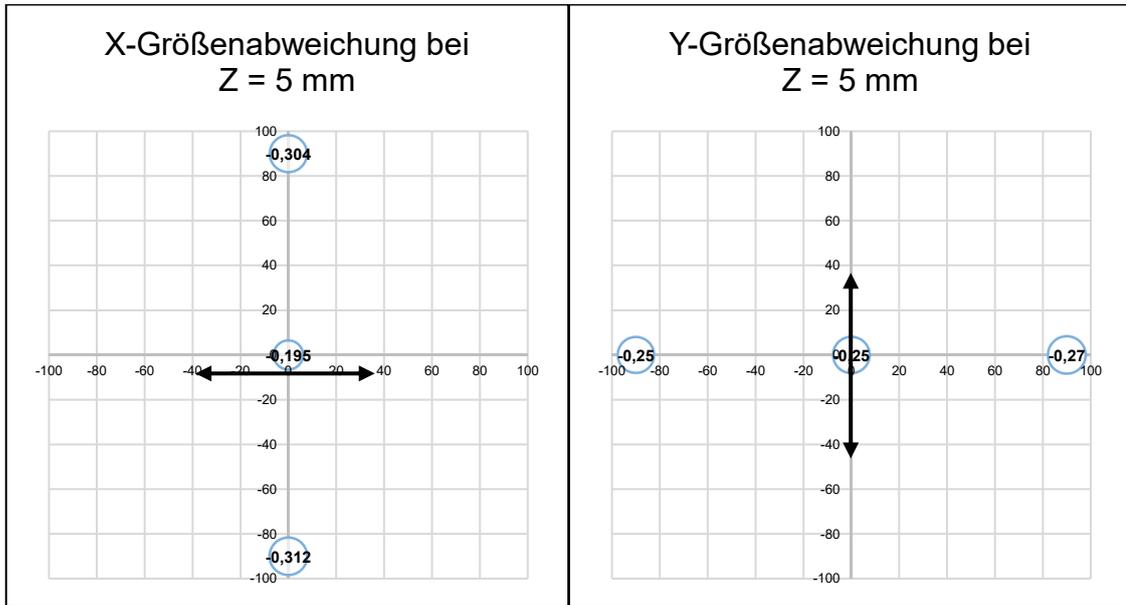


Abbildung 71 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 5 mm

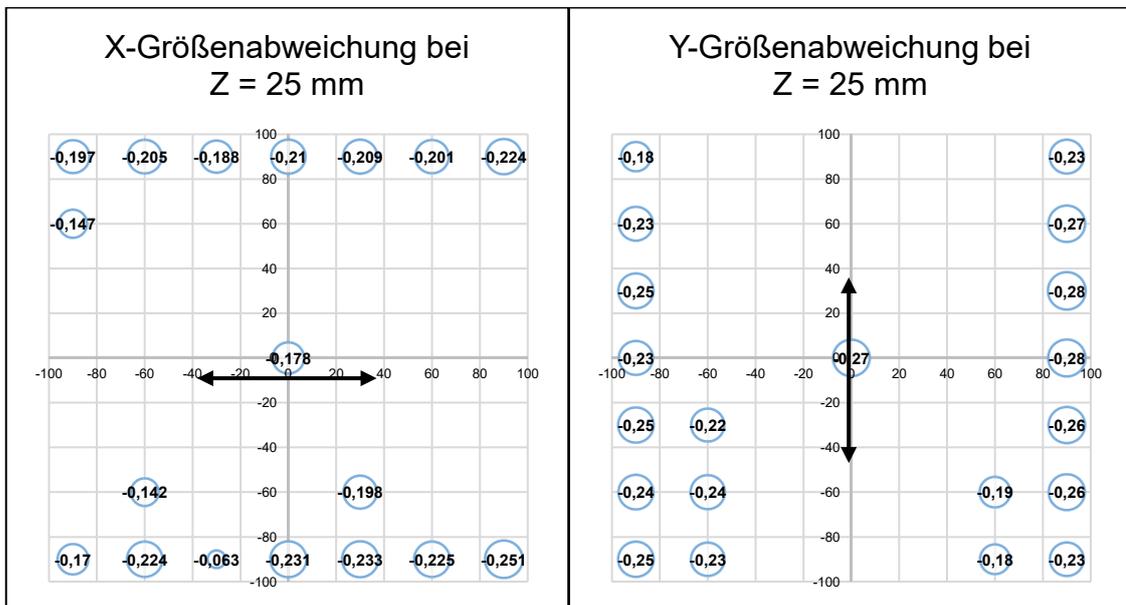


Abbildung 72 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 25 mm

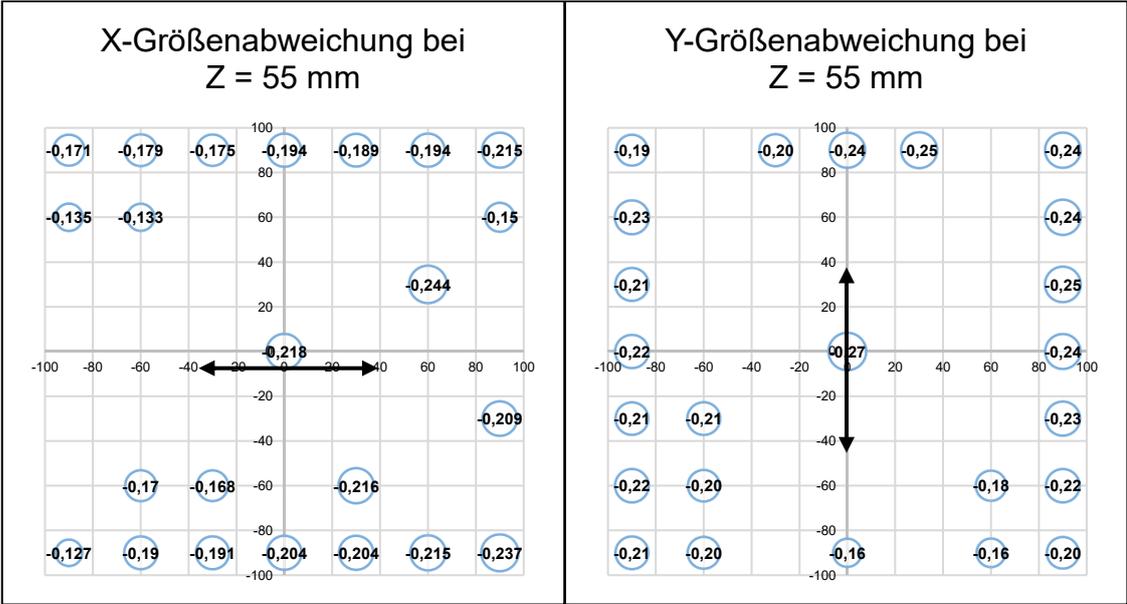


Abbildung 73 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 55 mm

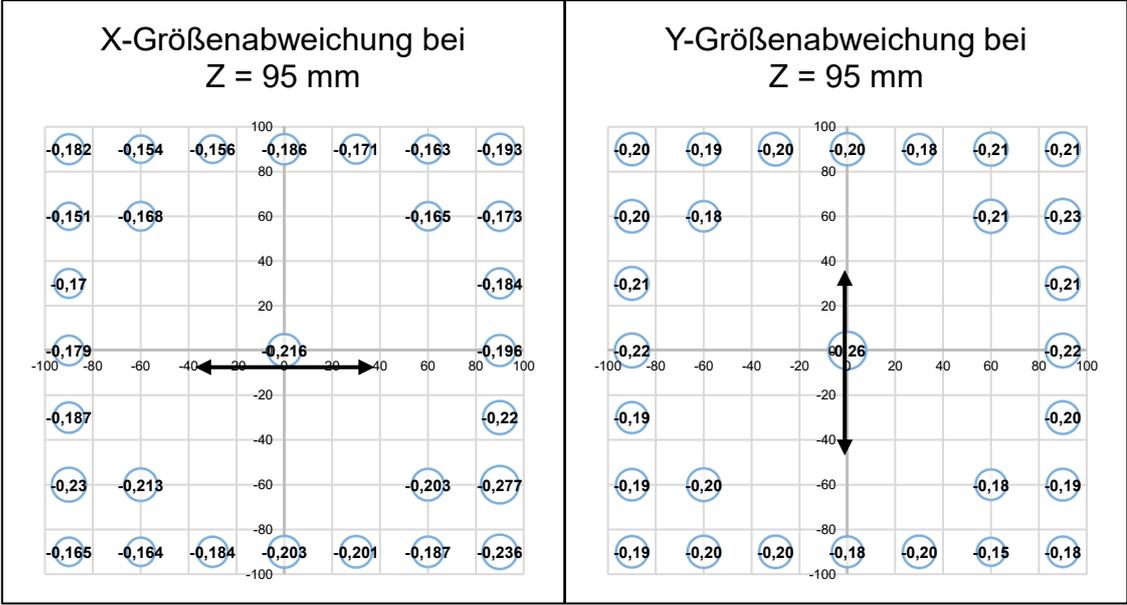


Abbildung 74 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 95 mm

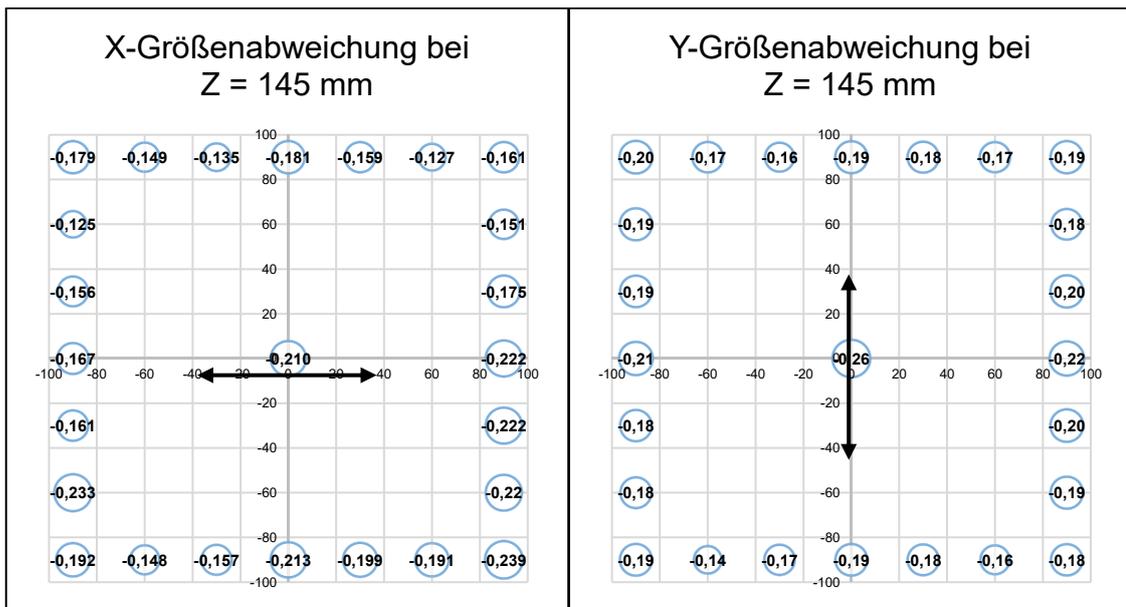


Abbildung 75 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 145 mm

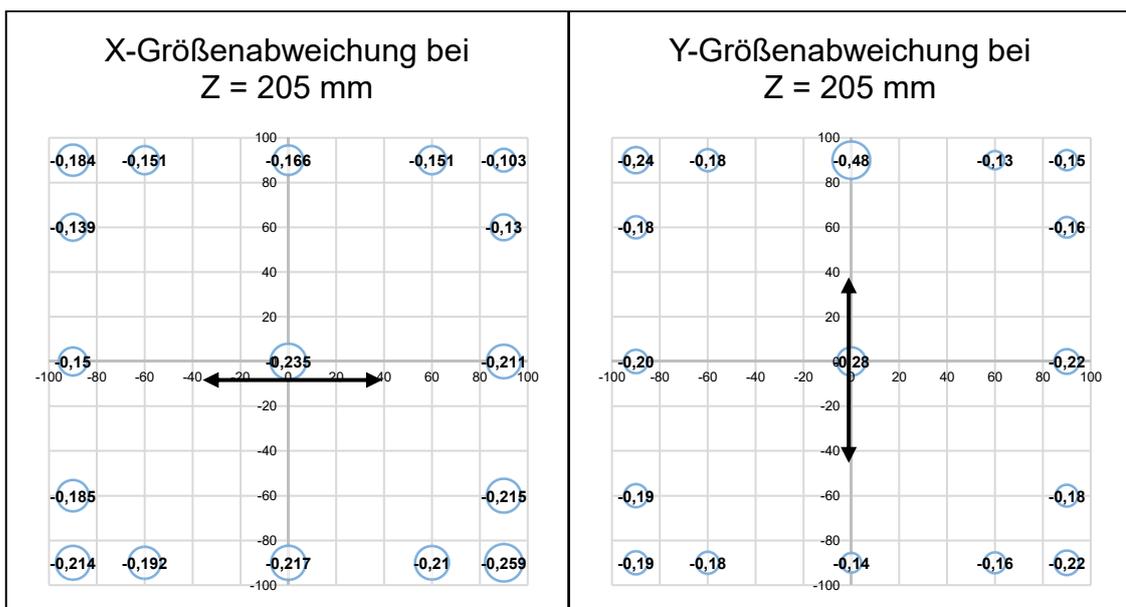


Abbildung 76 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 205 mm

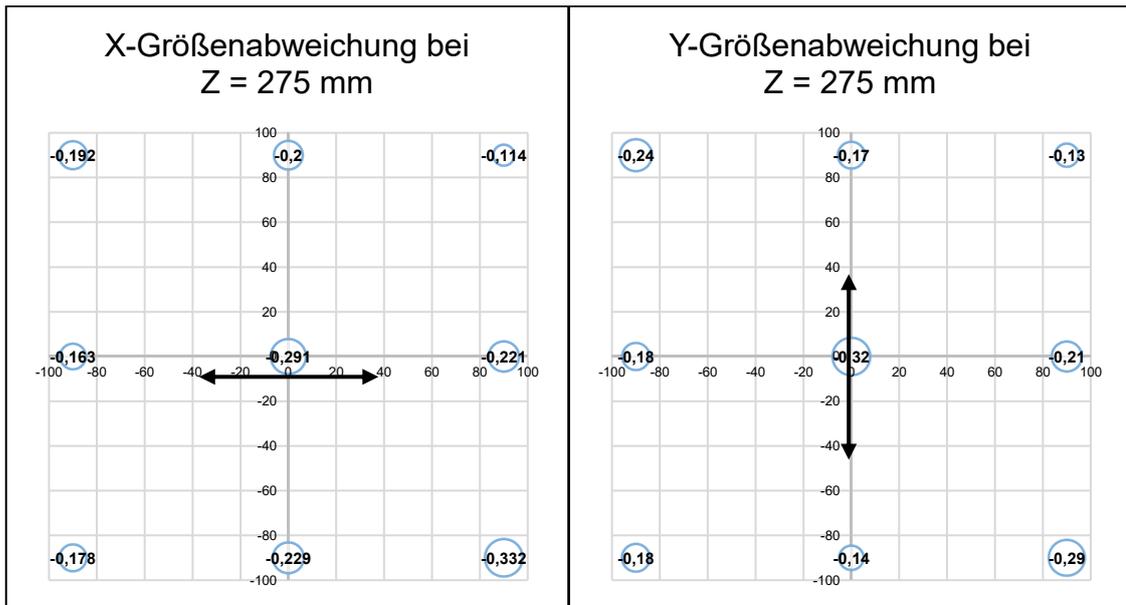


Abbildung 77 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 275 mm

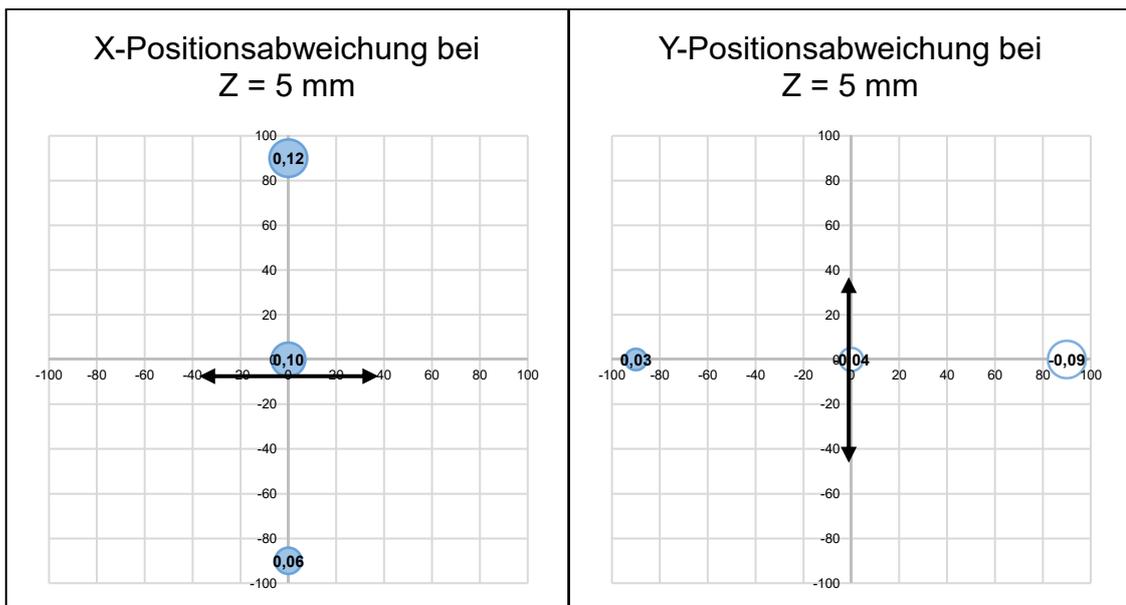


Abbildung 78 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 5 mm

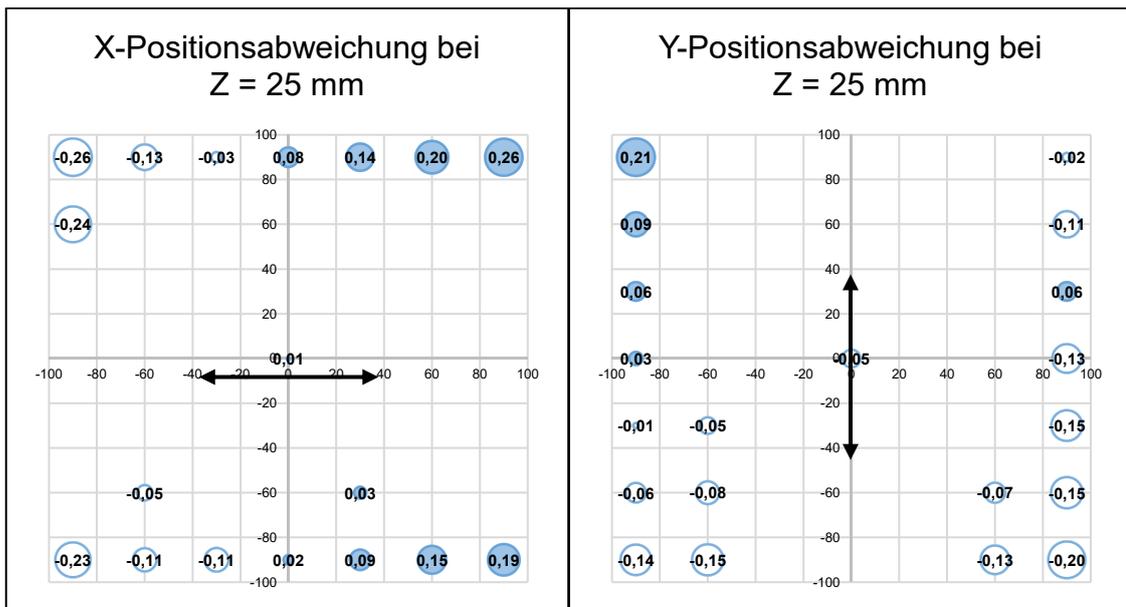


Abbildung 79 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 25 mm

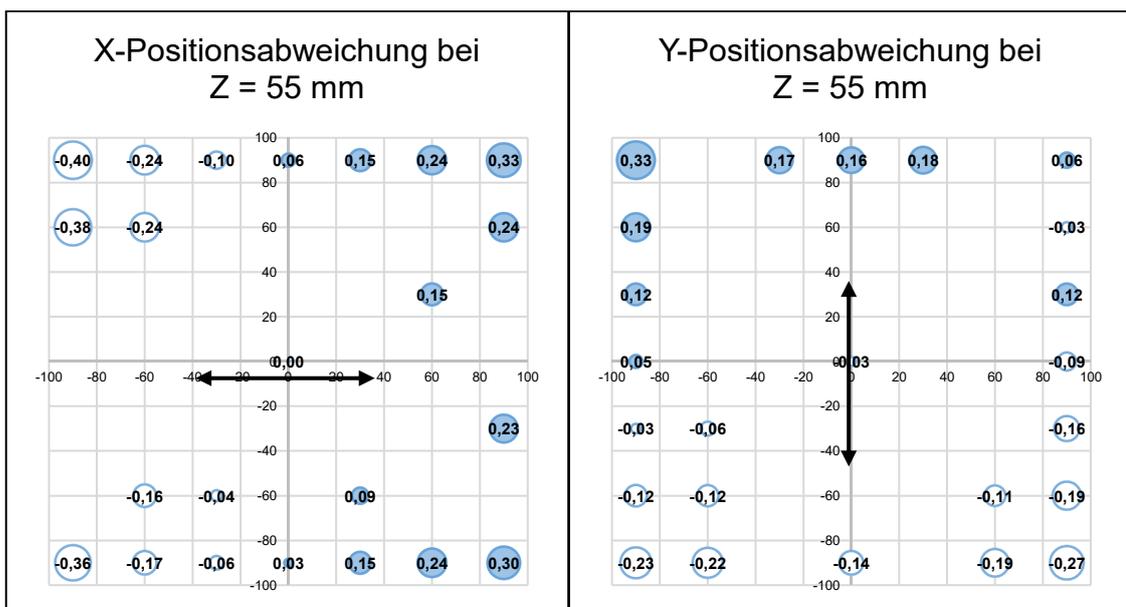


Abbildung 80 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 55 mm

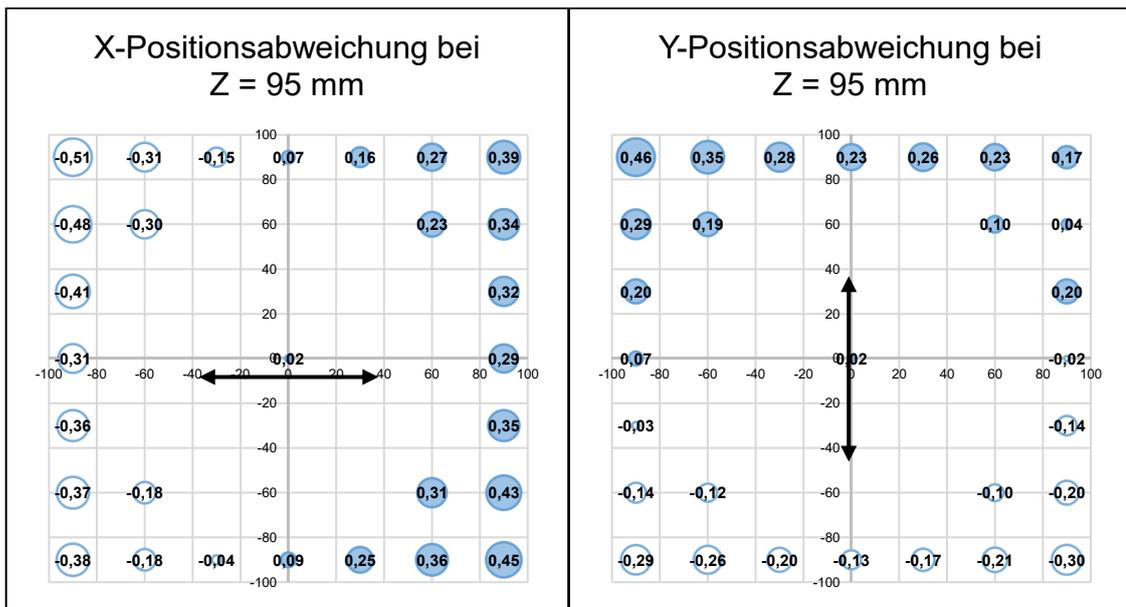


Abbildung 81 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 95 mm

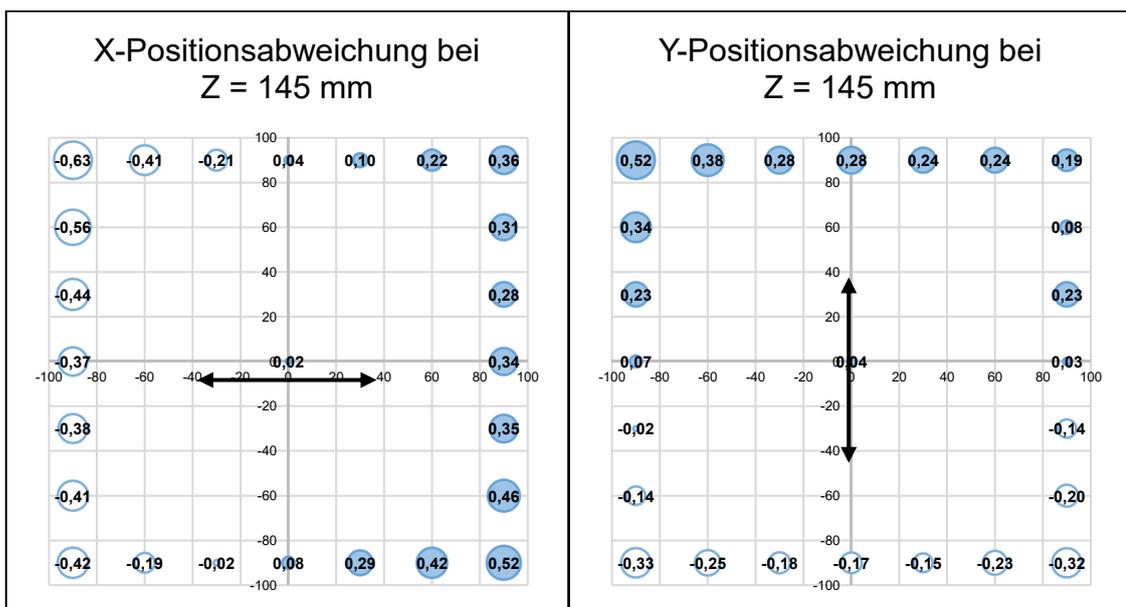


Abbildung 82 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 145 mm

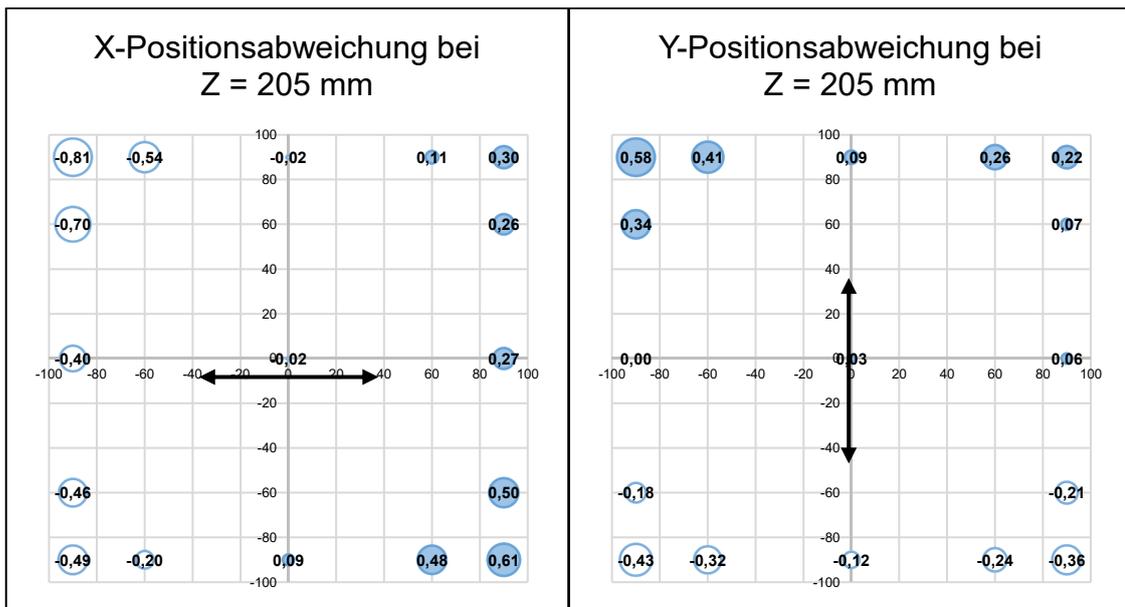


Abbildung 83 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 205 mm

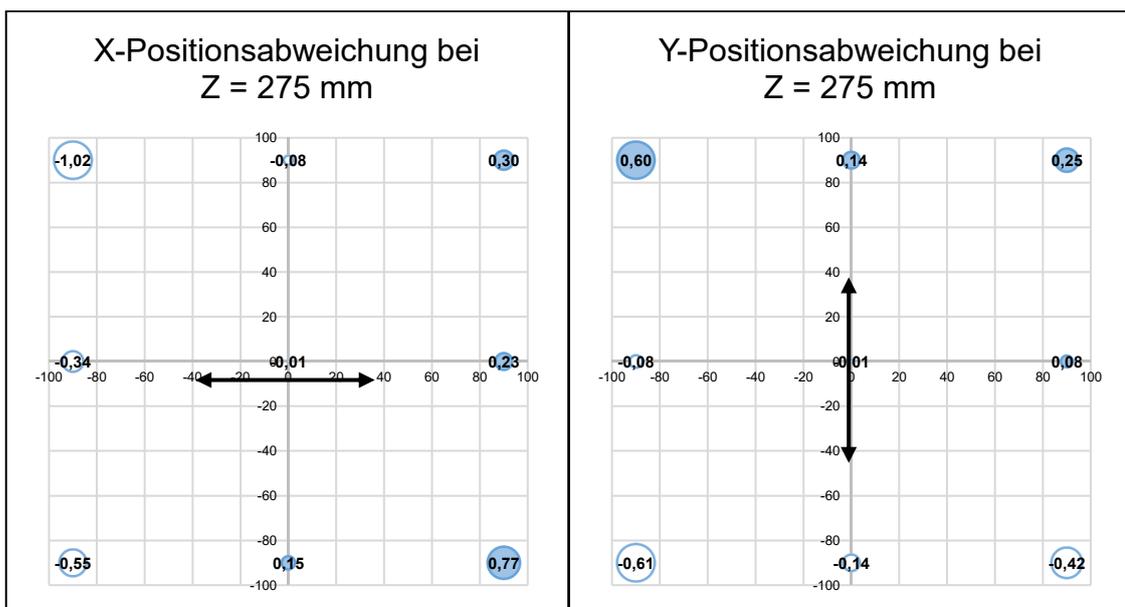


Abbildung 84 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der A2X bei einer Höhe von 275 mm

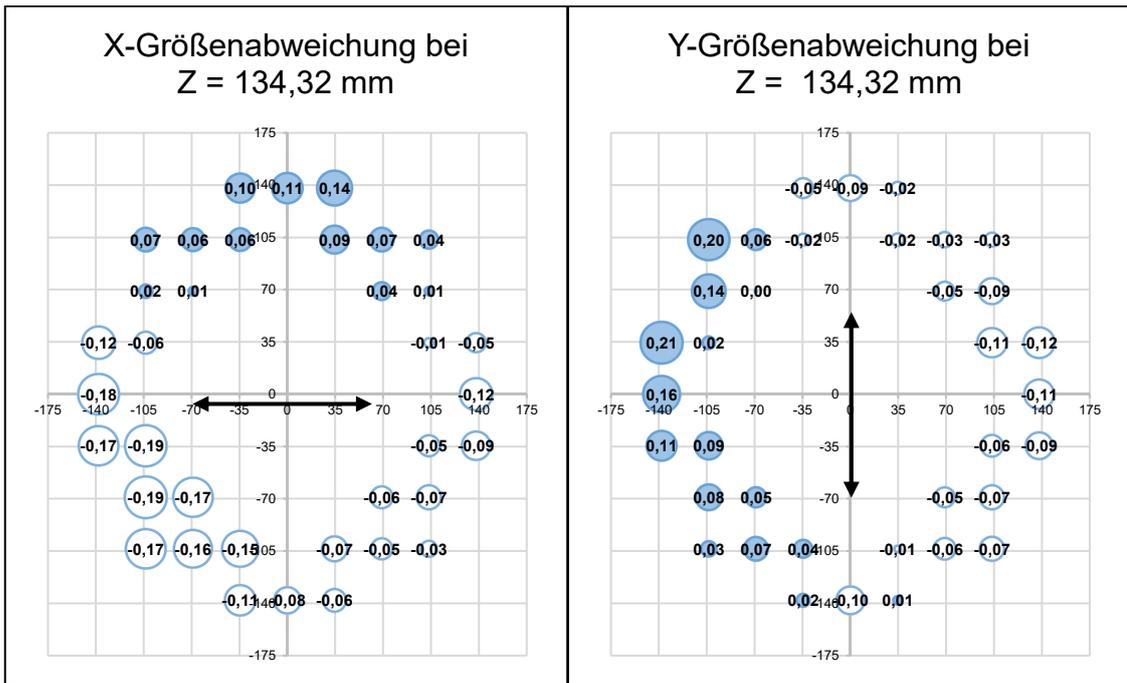


Abbildung 89 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 134,32 mm

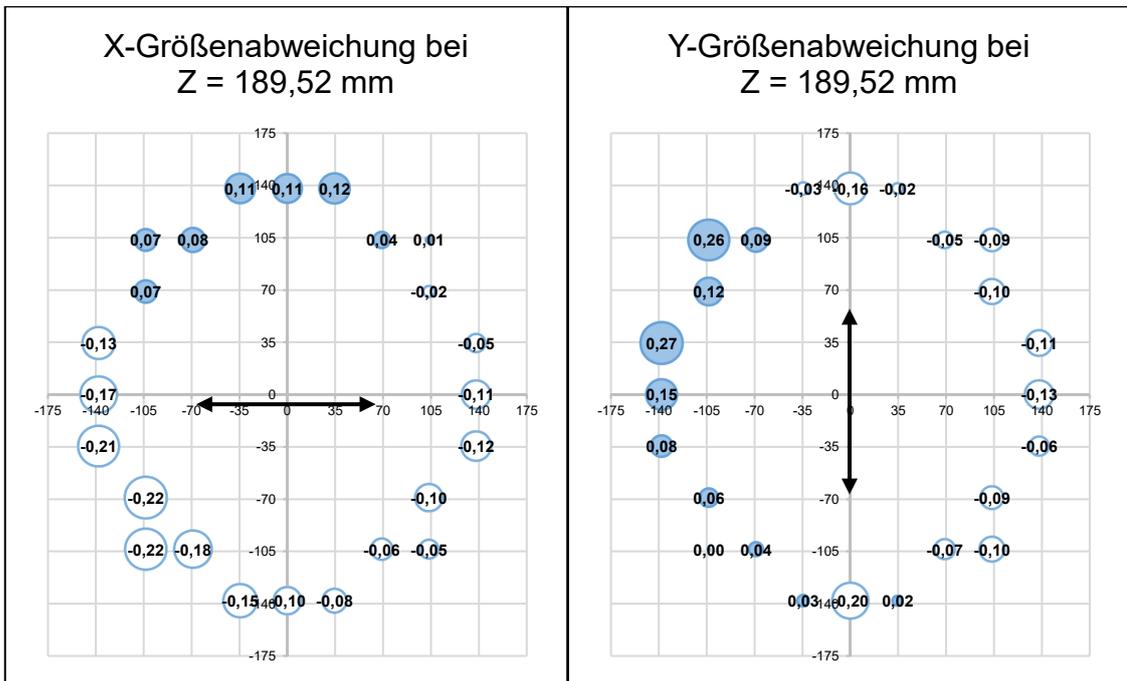


Abbildung 90 Größenabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 189,52 mm

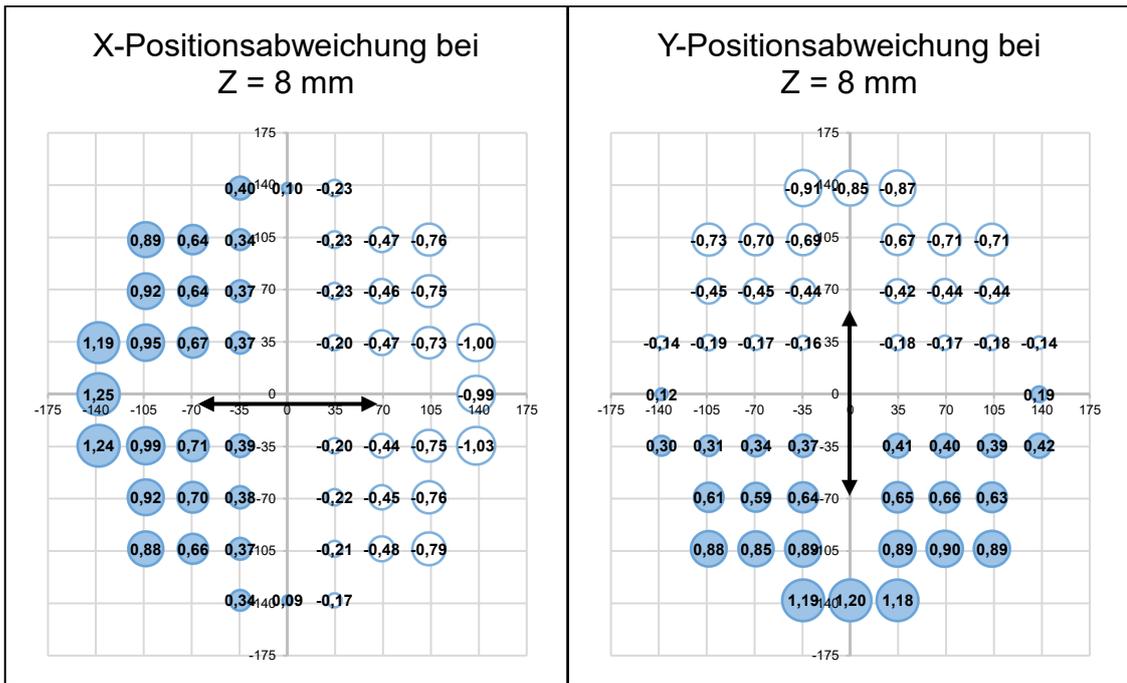


Abbildung 91 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 8 mm

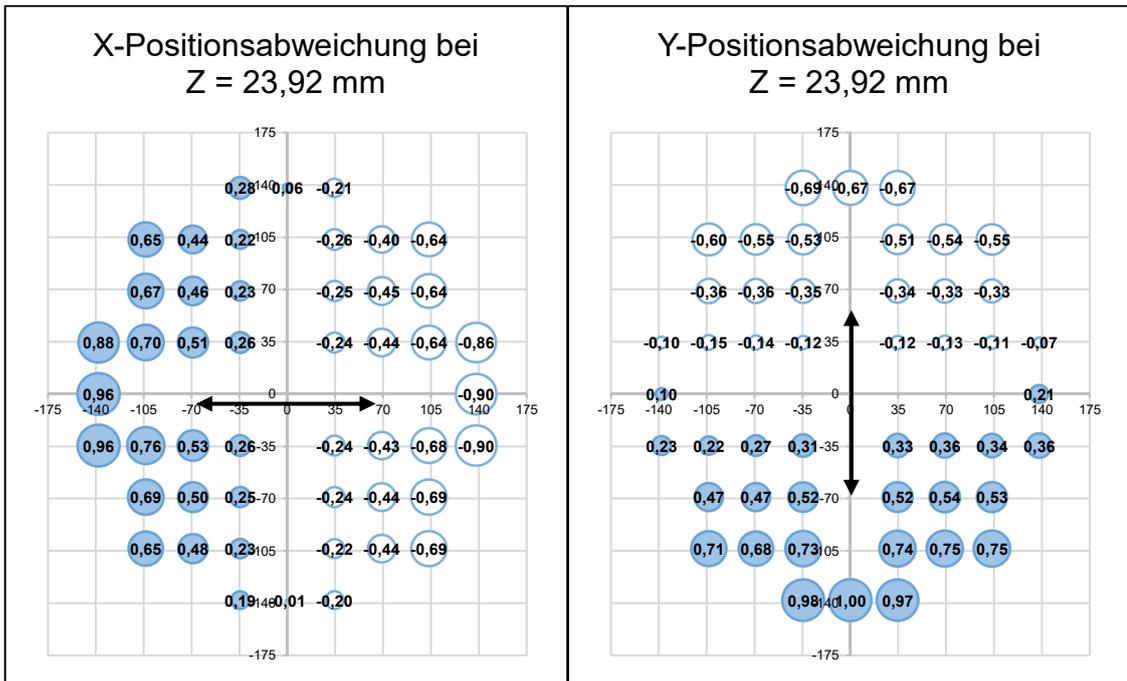


Abbildung 92 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 23,92 mm

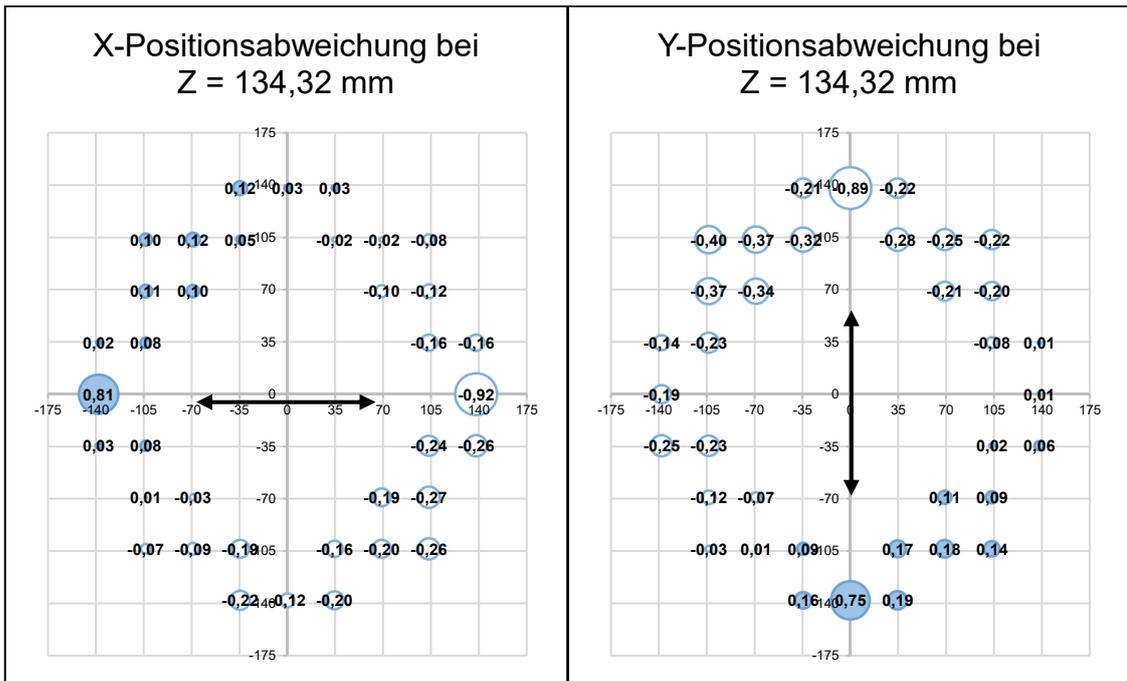


Abbildung 95 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 134,32 mm

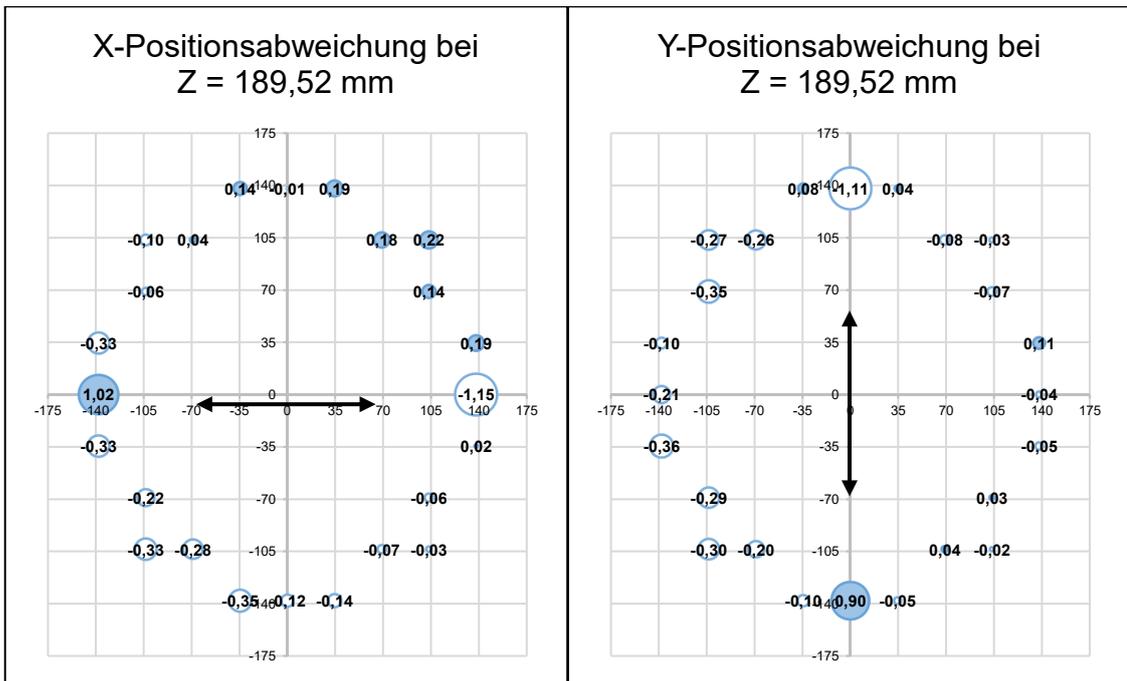


Abbildung 96 Positionsabweichungen des Bauraumdemonstrators der Q20plus bei einer Höhe von 189,52 mm

A-15 Konstruktionselemente des Geometriedemonstrators

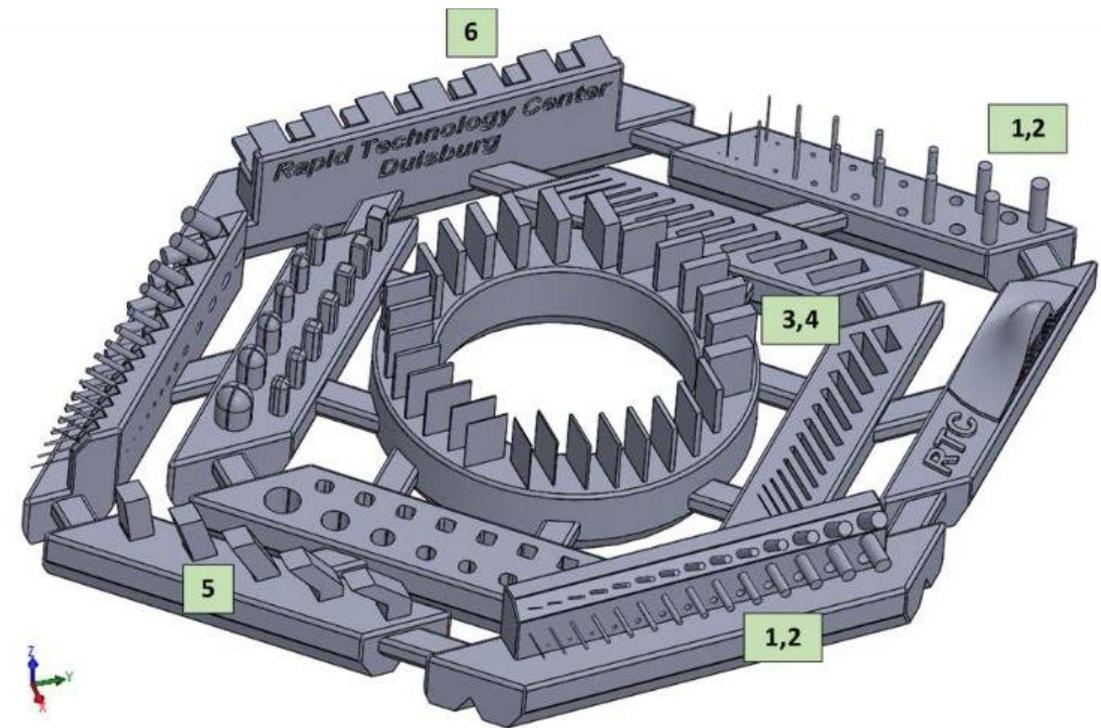
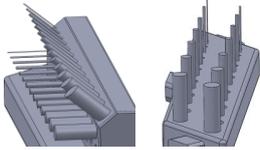
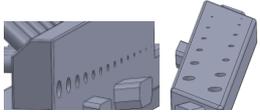
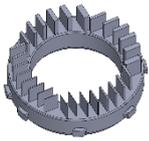
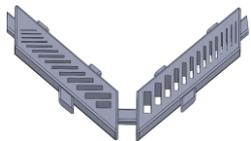
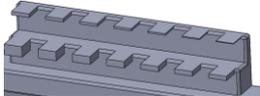


Abbildung 97 Einteilung der untersuchten Konstruktionselemente des Geometriedemonstrators

Tabelle 27 Beschreibung der Konstruktionselemente

KE	Geometrien	Beschreibung
1	Zylinder 	Zylinder mit einer Länge von 5 mm, einem Achswinkel 0° , 45° und 90° zur Bauebene und mit den Durchmessern 0,1 mm bis 1 mm in 0,1 mm Schritten, sowie in den Abstufungen 1,25 mm; 1,5 mm; 1,75 mm und 2 mm.
2	Bohrungen 	Durchgängige Bohrungen mit einer Länge von 4,5 mm bei 0° und einer Länge von 7 mm bei 90° zur Bauplatte mit den gleichen Durchmesserabstufungen entsprechend der Zylinder bei KE1.
3	Wände 	Wände mit 5 mm Breite, 7 mm Höhe und Dickenabstufungen in X- und Y-Richtung entsprechend der Zylinderdurchmesser bei KE1.
4	Spalten 	Durchgängige, 7 mm tiefe Spalten mit Einheitsbreiten von 7 mm und Spaltmaßvariationen entsprechend der Zylinderdurchmesser bei KE1.
5	Quader mit Winkel 	Stege mit quadratischem Querschnitt und Neigungen von 80° , 70° , 60° , 50° und 40° zur XY-Ebene und einer Höhe von 6 mm.
6	Überhangstege 	Rechteckige Überhänge mit der Breite und Überhanglänge von 3,5 mm und Dickenabstufungen in Z-Richtung entsprechend der Zylinderdurchmesser bei KE1.

A-16 Demonstrator zur Pulverentfernung

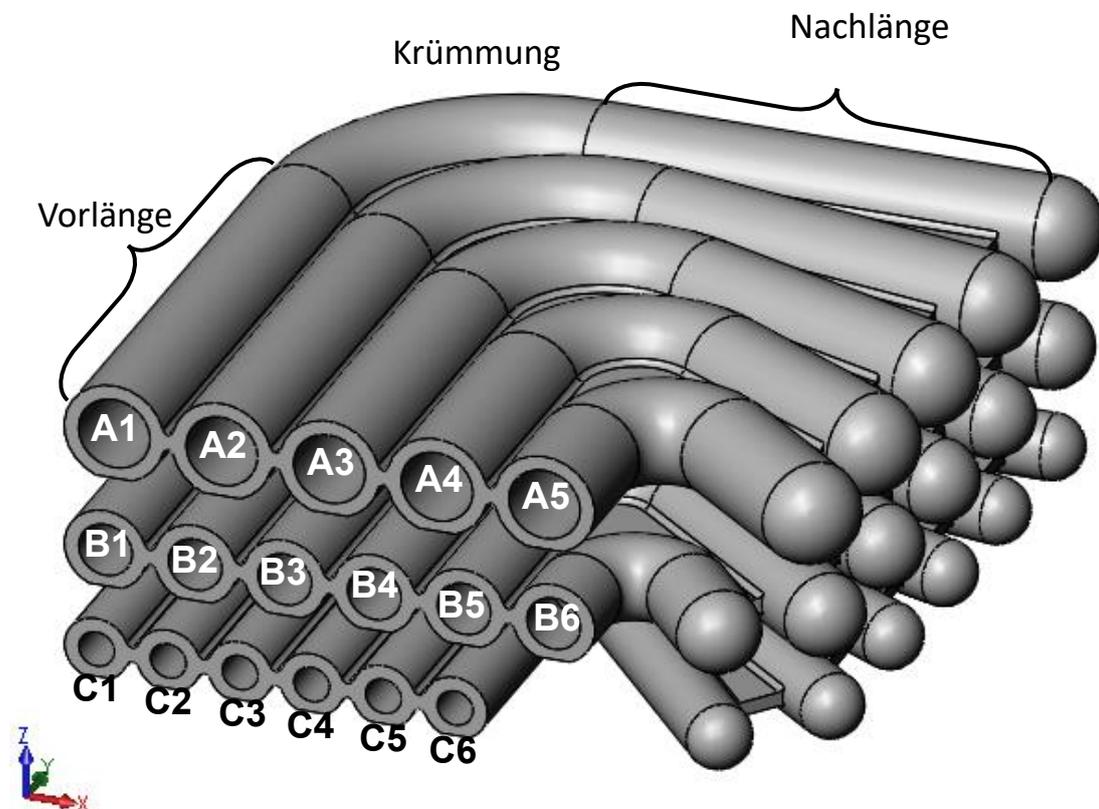


Abbildung 98 Demonstrator zur Untersuchung der Pulverentferbarkeit

Tabelle 28 Beschreibung des Demonstrators zur Pulverentferbarkeit

	Rohr- bezeichnung	Vorlänge [mm]	Mittlerer Krümmungs- radius [mm]	Krümmungs- winkel [°]	Nachlänge [mm]
$\varnothing = 10 \text{ mm}$	A1	70	30	90	63
	A2	60	25	80	49,41
	A3	48,08	20	70	38,48
	A4	33,8	15	60	29,44
	A5	16,48	10	50	21,63
$\varnothing = 7,5 \text{ mm}$	B1	70	30	90	64,25
	B2	62,75	25	80	53,22
	B3	54,07	20	70	45,13
	B4	43,62	15	60	39,55
	B5	30,92	10	50	36,32
	B6	9,8	7,5	40	11,85
$\varnothing = 5 \text{ mm}$	C1	70	30	90	65,5
	C2	65	25	80	57,03
	C3	59,04	20	70	51,78
	C4	51,9	15	60	49,65
	C5	43,24	10	50	51,01
	C6	32,52	5	40	40,77

A-17 Beschreibung der Stützstrukturgestalt

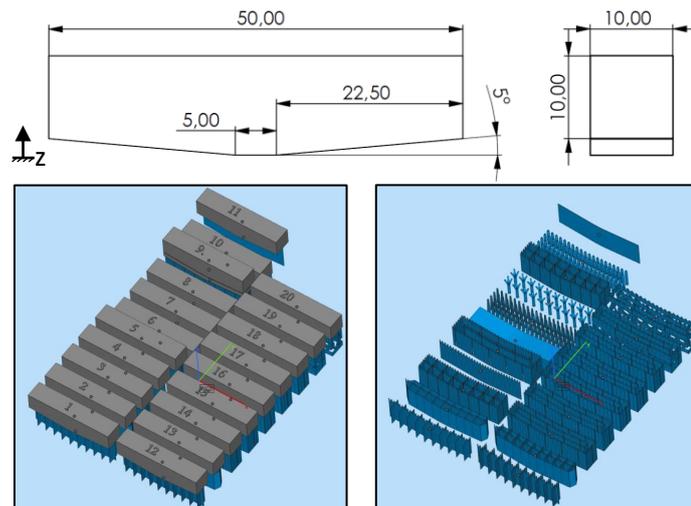


Abbildung 99 Probekörpermaße (oben), Nummerierung (links) und Stützstrukturgeometrien (rechts) der Versuchsreihe 1 zur Untersuchung der Stützstrukturgestalt

Tabelle 29 Beschreibung der Stützstrukturformen

Körper	Beschreibung der Stützstruktur
1	Liniensupport mit Verzahnung und nicht mit dem Bauteil verbundenen Querrippenverstärkung in 5 mm Abständen
2	Ähnlich Körper 1 mit Verbindung der äußeren Enden der Verstärkungen
3	Blocksupport mit Kontur
4	Liniensupport mit Verzahnung ohne Querrippen
5	Kontursupport mit Verzahnung und 4 mm Abstand der Konturlinien
6	0,4 mm Spalt und Volumensupport
7	Kegelsupport mit Abständen von ca. 2 mm
8	Baumsupport mit einem ‚Stamm‘ und 4 ‚Ästen‘
9	0,4 mm Spalt und 3 mm Volumensupport gefolgt von Blocksupport
10	Stiftsupport, erzwungen über Baumsupport mit Abständen von ca. 2 mm
11	Ähnlich Körper 4 ohne Zähne angebunden
12	Ähnlich Körper 1 mit am Bauteil angebundenen Querrippenverstärkungen
13	Ähnlich Körper 2 mit am Bauteil angebundenen Querrippenverstärkungen
14	Kontursupport mit Zahnparametervariation, Zahnbasislänge 1,2 mm
15	Kontursupport mit Zahnparametervariation, Zahnbasislänge 1,5 mm
16	Kontursupport mit Zahnparametervariation, Zahnbasislänge 1,8 mm
17	Kontursupport mit Zahnparametervariation, Zahnbasislänge 2,1 mm
18	Kontursupport mit Zahnparametervariation, Zahnbasislänge 2,4 mm
19	Kontursupport mit Perforation rechteckig
20	Kontursupport mit Perforation diamantartig

A-18 Untersuchungen der Stützstrukturgestalt

Tabelle 30 Bewertungstabelle der Versuchsreihe 1 zur Charakterisierung der Stützstrukturformen

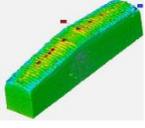
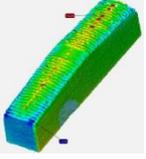
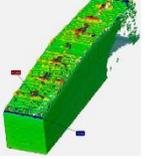
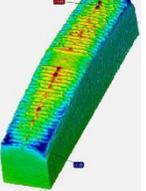
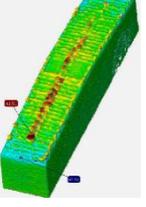
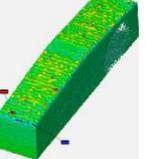
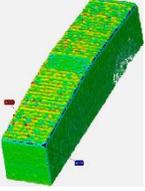
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Versuchskörper									Spalt verbunden ähnlich Körper 6	
Entfernbarkeit	3	3	1	4	4	0	4	0	0	4
Positive Abweichung	1,34	1,19	1,6	0,96	1,5	-	0,93	-	-	0,68
Zahnreste	1	2	0	3	0	-	3	-	-	4
Negative Abweichung	0,92	1,1	0,42	1,28	0,46	-	0,23	-	-	0,33
Verzug	0	0	2	0	2	-	4	-	-	3
Summe	4	5	3	7	6	0	11	0	0	11

Tabelle 30 Bewertungstabelle der Versuchsreihe 1 zur Charakterisierung der Stützstrukturformen (Fortsetzung)

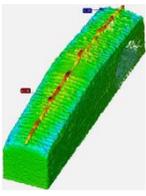
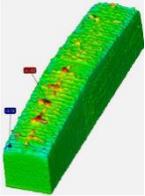
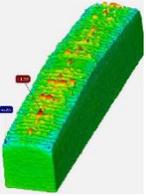
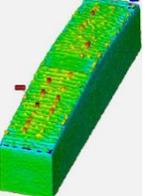
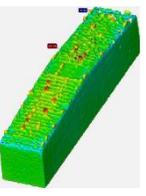
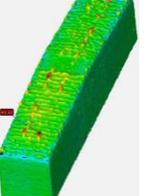
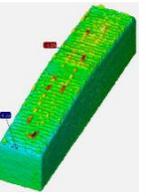
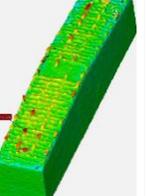
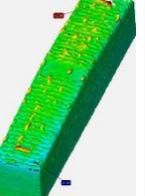
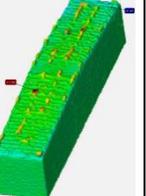
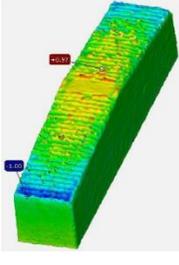
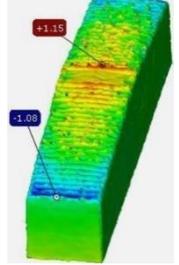
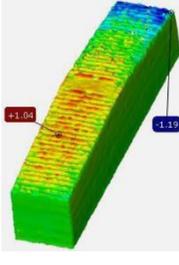
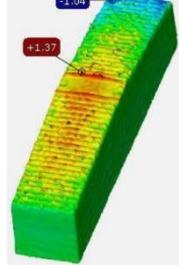
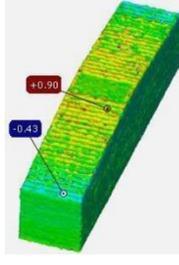
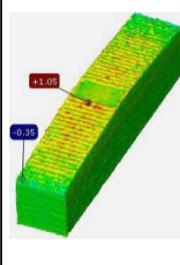
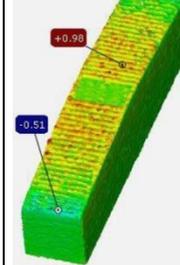
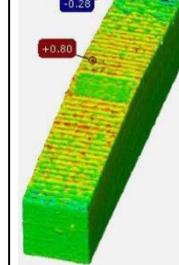
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Versuchskörper										
Entfernbarkeit	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Positive Abweichung	1,41	1,62	1,38	1,22	1,31	1,12	1,23	1,05	1,25	1,41
Zahnreste	1	0	1	2	1	2	2	3	1	1
Negative Abweichung	1,00	0,72	0,65	0,41	0,42	0,45	0,58	0,41	0,47	0,43
Verzug	0	0	1	2	2	2	1	2	2	2
Summe	3	1	3	6	5	6	5	7	5	5

Tabelle 31 Bewertungstabelle der Versuchsreihe 2 und 3 zur Charakterisierung der Stützstrukturformen

	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4
Versuchskörper								
Entfernbarkeit	4	4	4	4	4	4	4	4
Positive Abweichung	0,97	1,15	1,04	1,37	0,9	1,05	0,98	0,8
Zahnreste	3	2	3	1	3	3	3	4
Negative Abweichung	1,00	1,08	1,19	1,04	0,43	0,35	0,51	0,28
Verzug	0	0	0	0	2	3	1	4
Summe	<u>7</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>5</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>8</u>	<u>12</u>

A-19 Konstruktionskatalog für EBM mit Ti6Al4V

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V

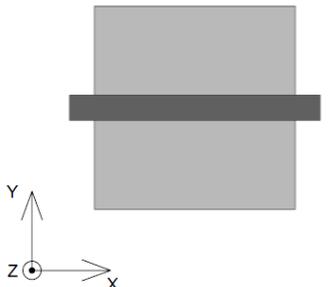
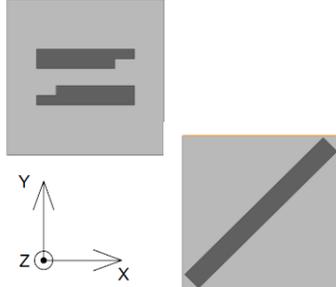
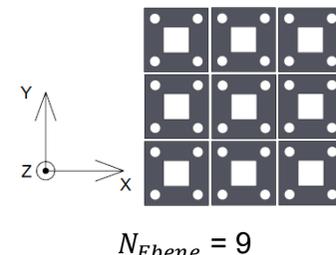
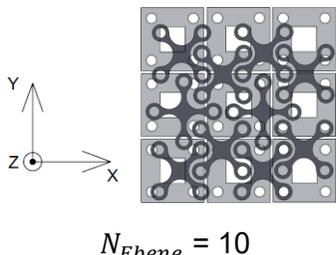
Gliederungsteil			Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Hauptprozessschritt	Grundelemente	Featureebene				
Gestaltung	Allgemeine Bauteildimensionen	Abmessungen	1			<p>Bei der Bauteilauswahl und -gestaltung für EBM ist darauf zu achten, dass die anlagenabhängigen, maximalen Bauraummaße nicht überschritten werden. Die Orientierung ist gegebenenfalls anzupassen.</p> <p>Mitunter können Bauteile geteilt und mit entsprechenden Verbindungen nachträglich vereint werden.</p>
		Gestaltungsansatz	2	 <p>$N_{Ebene} = 9$</p>	 <p>$N_{Ebene} = 10$</p>	<p>Strukturen ohne Funktion sind zu vermeiden oder möglichst zu zentralisieren, um durch effiziente Bauteilpositionierung die Anzahl an Bauteilen zu erhöhen und Zugänglichkeiten zur Endbearbeitung zu berücksichtigen.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

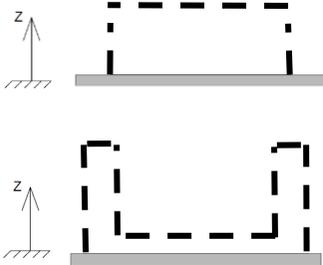
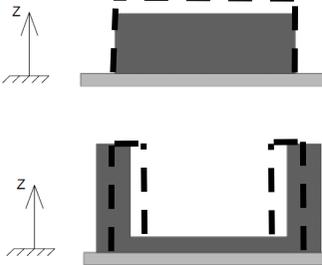
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Gestaltung	Allgemeine Bauteildimensionen	3	Soll-Geometrie	Ist-Geometrie	<p>Große Dimensionen weichen von deren Sollmaß ab. In Abhängigkeit der Strukturverläufe und deren Messstrecke kann dies mit den richtigen Skalierungsfaktoren kompensiert werden.</p> <p>Abweichungen entlang Z-Richtung: -0,5 mm bis 2 mm Abweichungen in XY-Ebene: ±0 mm bis 1,5 mm</p> <p>Allgemein sind die Maßabweichungen gemäß DIN EN ISO 2786-1c zu erwarten.</p>
					
	4	Kantenauflösung			<p>Eckenradien von mindestens 0,3 mm bei scharfen Kanten sind zu erwarten. Die Auflösung von Bauteilkanten in der XY-Ebene ist durch die Rundung des Strahlpunktes beziehungsweise des Schmelzbades vorgegeben.</p>
			<p>Durch die minimale Schmelzbadbreite entstehen bei spitz zulaufenden Winkeln entlang der Z-Richtung Verdickungen durch die minimal mögliche Wanddicke.</p>		

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

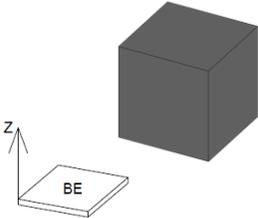
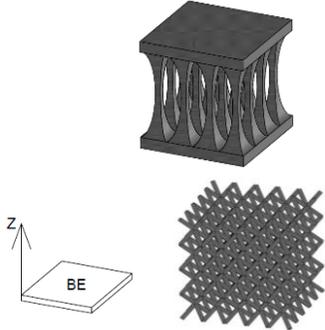
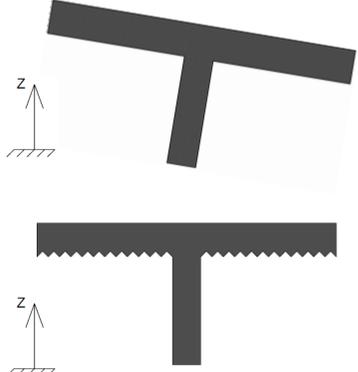
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Gestaltung	Allgemeine Bauteildimensionen	5			<p>Zur Effizienzsteigerung des Bauprozesses ist auf voluminöse Bauteile zu verzichten. Strukturverläufe sind in Anbetracht der Baurichtung, Überhänge und Beanspruchung zu entwerfen.</p> <p>Gitterstrukturen sind für Volumenfüllung ohne hohe Belastungen empfohlen. Die Entfernung des Überschusspulvers ist bei der Konstruktion des Gitters zu berücksichtigen.</p>
		6			<p>Bei spontaner Erhöhung der Schmelzfläche entstehen Verformungen an den Rändern der ersten Schichten der Strukturunterseite.</p> <p>Durch stetige Erhöhung der Schmelzfläche, beispielsweise bei einem kleinen Winkel oder entsprechenden Strukturen an der Unterseite, welche ein spontanes großflächiges Schmelzen verhindern, kann dies vermieden werden.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Gestaltung	Hohlräume	Grundlegende Gestalt	7			<p>Bei der Gestaltung von Hohlstrukturen sind unzugängliche Hinterschnitte zu vermeiden, da keine vollständige Pulverentfernung sichergestellt werden kann.</p> <p>Zusätzliche Öffnungen oder eine mehrteilige Bauteilgestalt sind in Betracht zu ziehen zur Entfernung des Überschusspulvers und zur Inspektion.</p>
		Pulver-entfernung	8			<p>Kanalöffnungsdurchmesser ≥ 5 mm sind zur Überschusspulverentfernung empfohlen. Die Pulverstrahltiefe, bis zu welcher die Kanäle und Gitter von Überschusspulver befreit werden können, beträgt ca. 8 mm. Das Entfernen durch mechanische Einwirkung ist nur direkt am gesinterten Pulver möglich. Die Zugänglichkeit dieser Einwirkungsmethode wie Pulverstrahlen oder Ausbürsten muss gewährleistet sein. Zusätzliche Öffnungen vereinfachen dies.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

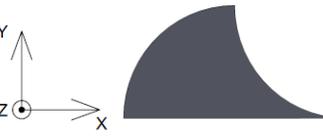
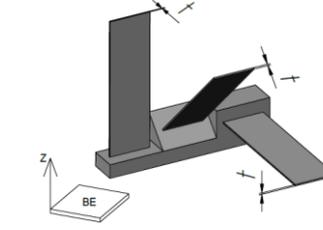
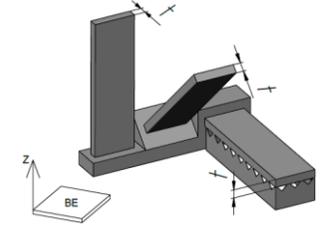
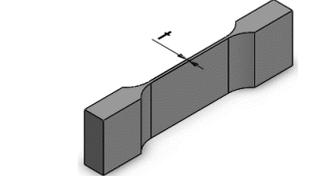
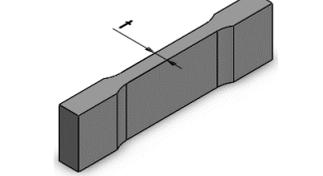
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Gestaltung	Radien und Rundungen	Überhang- radien	9			Um Baufehler oder Stützstrukturen zu vermeiden, ist ein Radius $< 4 \text{ mm}$ zu berücksichtigen. Generell sind Radien zur Vermeidung konstruktiver Kerben bei Strukturübergängen empfohlen.
		Orientierung	10			Durch die Schichtzerlegung wird der Treppenstufeneffekt an Oberflächenrundungen sichtbar. Die Umorientierung oder Umgestaltung dieser Rundungen ist zur Vermeidung möglich.
	Wandungen	Minimale Wandstärke	11			Die minimale Wandstärke t beträgt ca. $0,6 \text{ mm}$. Kleiner konstruierte Wände entstehen bei dieser verfahrensbedingten Minstdicke. Unterhalb des kritischen Downskin-Winkels ist Support empfohlen.
		Lasttragende Wandstärke	12			Für lasttragende Wandstärken gilt $t > 3 \text{ mm}$. Zu schmale Wände besitzen andere Festigkeitseigenschaften verglichen mit ermittelten Werten nach Norm.

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Gestaltung	Bohrungen	Minimale Bohrungsgröße	13			<p>Innendurchmesser d von Bohrungen sind so zu gestalten, dass diese nicht verschlossen werden. Es ist zwischen der Herstellbarkeit und Überschusspulverentfernung zu unterscheiden.</p> <p>Herstellbar: Achse II Z: $d \geq 0,3 \text{ mm}$ Achse II BE: $d \geq 0,5 \text{ mm}$</p> <p>Pulver entfernbar: Achse II Z: $d \geq 0,6 \text{ mm}$ Achse II BE: $d \geq 0,8 \text{ mm}$</p> <p>Bei geneigten Bohrungen sind die Werte für BE zu empfehlen. Das Aspektverhältnis ist zu beachten.</p>
		Bohrungstypen	14			<p>Durchgangsbohrungen sind aufgrund der Pulverentfernung zu bevorzugen.</p>
		Orientierung	15			<p>Bohrungen sind möglichst entlang der Z-Achse zu orientieren, um den Treppenstufeneffekt und die Maßungenauigkeiten zu vermeiden.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

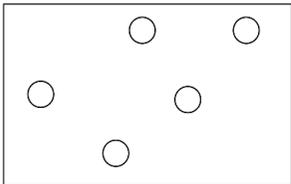
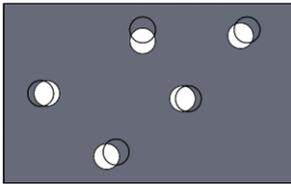
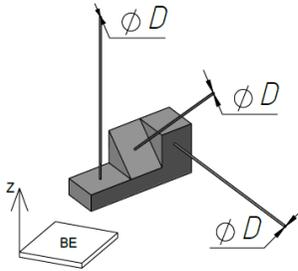
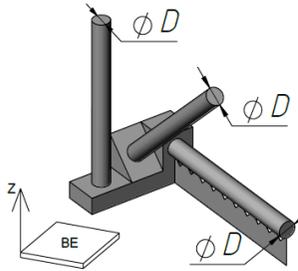
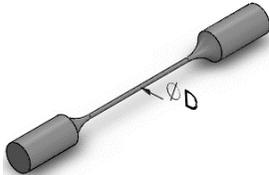
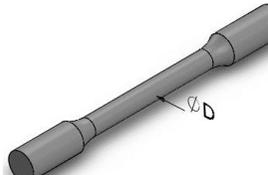
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Gestaltung	Bohrungen	Positionierung 16	<p>Soll-Position</p> 	<p>Ist-Position</p> 	<p>Lagetolerierte Bohrungen sind zu schließen und nachträglich maschinell einzubringen. Beaufmaßte Bohrungen führen mitunter zu unzureichender Positionsgenauigkeit und sind daher zu vermeiden. Entsprechende Zugänglichkeiten werden benötigt.</p>
	Zylinder	Minimaler Zylinderdurchmesser 17			<p>Der minimale Zylinderdurchmesser D beträgt ca. 0,6 mm. Kleiner konstruierte Zylinder entstehen mit dieser verfahrensbedingten Mindestdicke. Unterhalb des kritischen Downskin-Winkels ist Support empfohlen.</p>
		Lasttragende Zylinderdurchmesser 18			<p>Für Lasttragende Zylinderdurchmesser gilt $D > 3$ mm. Zu schmale Zylinder besitzen andere Festigkeitseigenschaften verglichen mit ermittelten Werten nach Norm.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

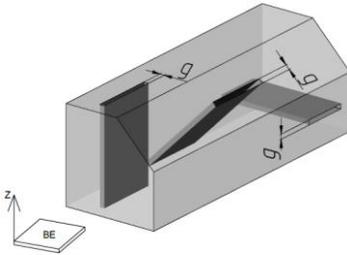
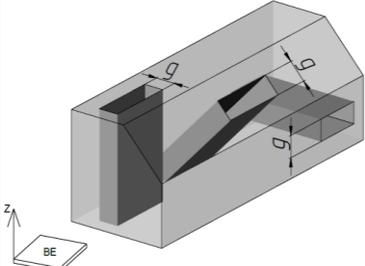
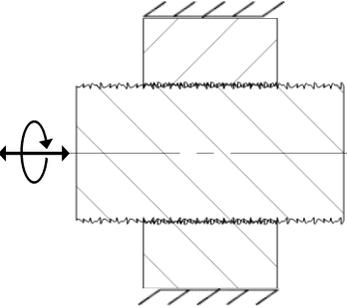
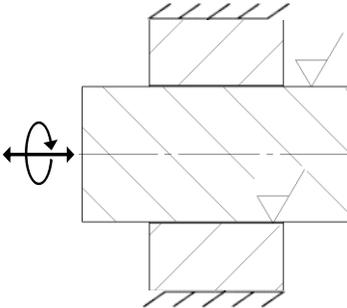
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Gestaltung	Spalte	Minimale Spaltmaße	19			<p>Die kleinsten Spaltmaße g sind so zu gestalten, dass die Spaltwände nicht zusammenwachsen. Zusätzlich ist zwischen Spaltentstehung und Pulverentfernung zu unterscheiden.</p> <p>Herstellbar: Z: $g_Z \geq 0,8 \text{ mm}$ BE: $g_{XY} \geq 0,5 \text{ mm}$</p> <p>Pulver entfernbar: Z: $g_Z \geq 0,8 \text{ mm}$ BE: $g_{XY} \geq 0,8 \text{ mm}$</p> <p>Bei geneigten Spalten sind die jeweils größeren Werte zu empfehlen. Spalte, deren Überhangflächen kritische Downskin-Winkel aufweisen, benötigen je nach deren Breite im Inneren Stützstrukturen.</p>
		Funktionalität	20			<p>Bei technischen Anforderungen sollten die Teile separat gefertigt und nach entsprechender Endbearbeitung vereinigt werden, um die Funktionalität sicher zu gewährleisten. Übermaß zur Endbearbeitung ist zu berücksichtigen.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Gestaltung	Überhänge	Kritischer Überhangswinkel	21		<p>Wird der kritische Downskin-Winkel δ_{krit} unterschritten, werden Stützkonstruktionen für die verformungsfreie Fertigung benötigt.</p> $\delta_{krit} < 50^\circ$ <p>Filigrane und mit Vermeidung von Überhitzung gefertigte Strukturen mit geringeren Winkeln sind ohne Support möglich.</p>
		Freitragende Überhanglänge	22		<p>Besitzen Überhangstrukturen mit $0^\circ < \delta_{krit} < 50^\circ$ eine bestimmte kritische Überhanglänge l_{krit} sind Supports erforderlich. Unterhalb dieser Länge sind Überhangstrukturen selbsttragend und benötigen keine Stützstrukturen.</p> $l_{krit} > 3 \text{ mm}$ <p>Eine ungestützte kritische Überhanglänge verursacht Formfehler.</p> <p>Für beidseitig angebundene Überhängen wie beispielsweise brückenartigen Strukturen gilt $l_{krit} > 6 \text{ mm}$.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

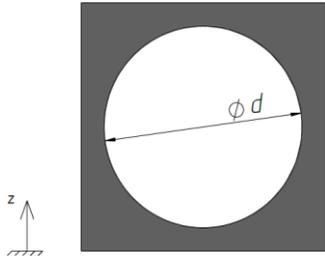
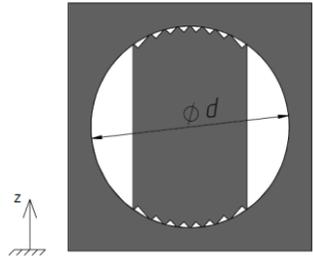
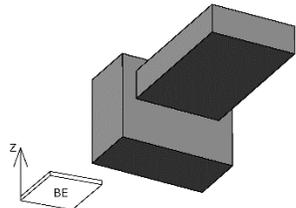
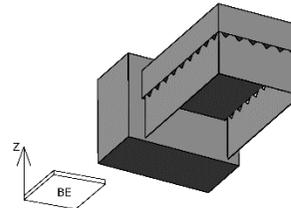
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Gestaltung	Überhänge	Freitragender Bohrungsdurchmesser	23			<p>Große Bohrungsdurchmesser sind im kritischen Überhangbereich abzustützen.</p> <p>Dieser entspricht in etwa $\frac{1}{3}d$.</p> <p>Nahezu verformungsfreie Durchmesser lassen sich bis zu $d \leq 8$ mm ohne Stützstruktur fertigen. Größere Bohrungen ohne Supports sind möglich, zeigen allerdings beginnende Verformungseffekte im oberen Bereich der Rundung.</p>
		Besonderheiten	24			<p>Überhänge, deren Downskin-Fläche parallel zur Bauebene verläuft, benötigen vorrangig an den Randbereichen Stützstrukturen. Die darin eingeschlossene Fläche ist selbsttragend entsprechend Nr. 22.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Gestaltung	Stützstrukturen	Bauteil-anbindung	25			Die Anbindung von Supportstrukturen ist vereinzelt auszuführen, um die Entfernbarekeit zu ermöglichen. Supports sind bei lokalen Minima zu platzieren und sobald der kritische Überhangwinkel unterschritten wird.
		Abstand der Stützstrukturen	26			Der Abstand der Stützstrukturen SLa ist so zu wählen, dass kein Bauteilverzug entsteht und der Support einfach entfernt werden kann. $2 \text{ mm} \leq SLa \leq 6 \text{ mm}$
		Länge der Stützstrukturen	27			Supports müssen an deren Unterseite nicht verbunden sein. Eine minimale Supporthöhe Sh ist zu berücksichtigen. $5 \text{ mm} \leq Sh \leq 20 \text{ mm}$ Je größer der Abstand SLa ist, umso größer ist Sh zu wählen. Wenn die Stützstruktur auf darunterliegende Bauteilstruktur trifft, kann $1 \text{ mm} \leq Sh \leq 5 \text{ mm}$ bei Berücksichtigung von Nr. 40 betragen.

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Gestaltung	Supportstrukturen	Zugänglichkeit	28		Bei der Notwendigkeit von Support ist die umliegende Struktur so zu gestalten, dass die Zugänglichkeit und ausreichende Energieaufbringung zur Entfernung garantiert sind.
		Stützstruktur-gestalt	29	<p>Grundlegend ist die Bauteilstruktur und Orientierung so zu planen, dass Support vermieden wird, da die Bauzeit und der Materialverbrauch steigen.</p> <p>Sollten Supports nötig sein, ist die effizienteste Strukturgestalt der Stiftsupport, welcher ausschließlich mit dem Konturthema geschmolzen wird und folgende Gestalt besitzen sollte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $0,6 \text{ mm} \leq SLa \leq 3 \text{ mm}$ bei $2 \leq Sh \leq 10 \text{ mm}$ und $g_z \geq 0,8 \text{ mm}$ • Durchmesser bei Anbindung zum Bauteil = 0,6 mm • Stiftkopfhöhe = 1,8 mm • Stiftdurchmesser = 1,5 mm 	

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

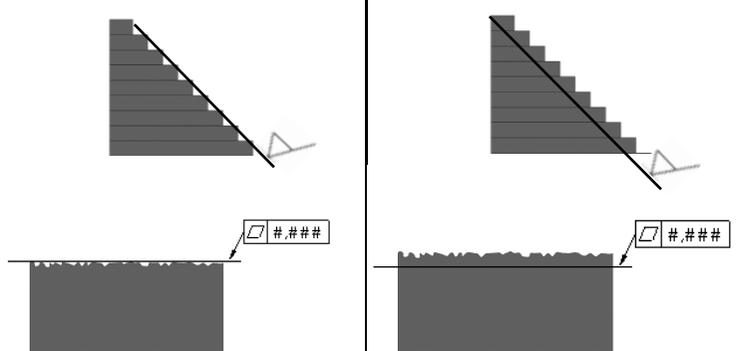
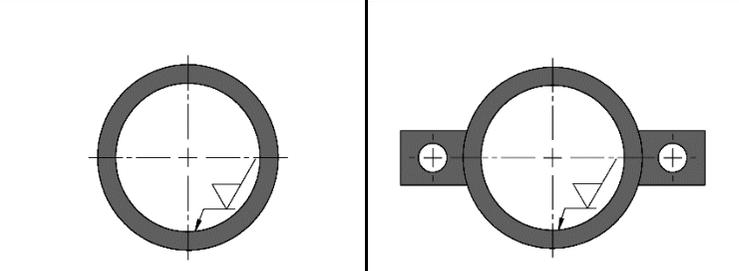
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Endbearbeitung	Allgemein	Übermaß			<p>Aufgrund von Form-, Lage- und Maßabweichungen ist ein Übermaß abhängig von der Orientierung und Positionierung an Funktionsgeometrien vorzusehen. Zur Erzeugung von glatten, porenfreien und maßhaltigen Geometrien gilt:</p> <p>Übermaß pro Funktionsfläche \approx Distanzabweichung entsprechend DIN EN ISO 2786-1c zur Maßreferenz + 0,5 mm auf jeweiliger Oberfläche</p>
		Bearbeitungsflächen			<p>Je nach Verfahren sollte eine endbearbeitungsgerechte Gestaltung berücksichtigt werden. Funktionsflächen sind möglichst klein und einfach erreichbar zu dimensionieren.</p>
		Einspannung			<p>Zusätzliche Aufspanngeometrien für mögliche mechanische Nachbearbeitungen sind empfohlen. Diese sollten möglichst nahe an den zu bearbeitenden Flächen platziert werden. Verformungen der zu bearbeitenden Fläche sind durch geeignete Fixierungen zu vermeiden.</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

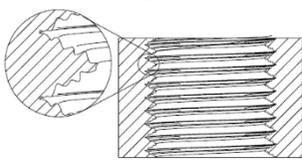
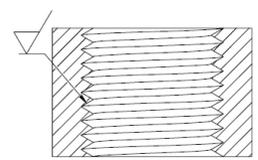
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Endbearbeitung	Allgemein	Referenzflächen 33	<p>Referenzflächen, Bohrbildreferenzen oder andere Referenzgeometrien können nicht direkt gefertigt werden. Folgende Schritte zur Endbearbeitung mit Referenzflächen sind empfohlen.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Beaufmaßung der Referenzgeometrie und aller damit verbundener Geometrien nach Nr. 30. Bohrungen, welche Toleranzen besitzen, sind zu schließen. 2. Fertigung des Bauteils und Einspannung zur Nacharbeit. 3. Einmessen und Antasten mehrerer zu bearbeitender Geometrien, Ausrichtung der virtuellen Geometrien zur realen und Erzeugung der Referenzfläche mit maximal 0,5 mm Materialabtrag. Kontrollmessungen für ausreichend Aufmaß an allen weiteren nachzubearbeitenden Geometrien sind zu empfehlen. 4. Bearbeitung aller weiteren tolerierten Geometrien. 			
	Mechanische Nachbearbeitung	Drehen, Fräsen, Bohren	34	<p>Werkzeugauslauf und -zugänglichkeit sind zu berücksichtigen. Die Geometrien sollten so dimensioniert sein, dass wenig Rüst-, Umspann- und Bearbeitungsaufwand resultiert. Verfahrensspezifische Konstruktionsempfehlungen und Gestaltungselemente wie Freistiche, Gewindeausläufe und Fräsradien sind zu beachten.</p>		
		Gewinde	35	<p>wie-gebaut</p> 	<p>nachbearbeitet</p> 	<p>Gewinde lassen sich nicht funktionsgerecht fertigen und müssen nachträglich eingebracht werden. Das Nachschneiden des additiv vorgefertigten Gewindes ist möglich.</p>
Oberflächenqualität	Glättung der Oberfläche	36	<p>Das Nachbearbeiten der Oberfläche ist entsprechend der Funktion der Fläche durchzuführen. Zur Glättung der Oberfläche sind strahlende oder elektrochemische Verfahren empfohlen. Werden zusätzlich Form- und Lagetoleranzen gefordert, ist die mechanische Nachbearbeitung unumgänglich. Aufmaß nach Nr. 30 und Bearbeitung nach Nr. 33 sollten berücksichtigt werden.</p>			

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise	
Planung des Bauzyklus	Positionierung im Bauraum	Anbindung an die Bauplattform	37			Das Vereinen mit der Bauplattform ist nicht zu empfehlen. Bauteile können direkt auf der Bauplattform entstehen und lassen sich ohne maschinellen Aufwand von der Bauplattform entfernen. Bauteile mit Maßhaltigkeitsanforderungen sollten auf Support gefertigt werden, um Material für das Endbearbeiten zu erzeugen.
		Position auf der Bauplattform	38			Zur Positionierung der Bauteile auf der Bauplattform ist ein Randabstand von mindestens 5 mm empfohlen. Bauteile sollten zentral positioniert werden, um Schwankungen der Werkstoffeigenschaften wie Porosität, Festigkeit und Gefügeerscheinung zu minimieren.
		Anzahl an Bauteilen	39			Aus Effizienzgründen ist der Bauraum in einer Schicht beziehungsweise in der XY-Ebene komplett auszunutzen. Am Rand der Bauplattform weisen Bauteile mitunter Schwankungen der Werkstoffeigenschaften auf.

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

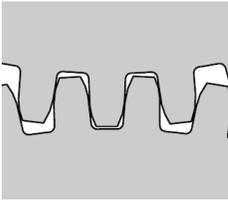
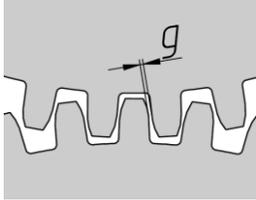
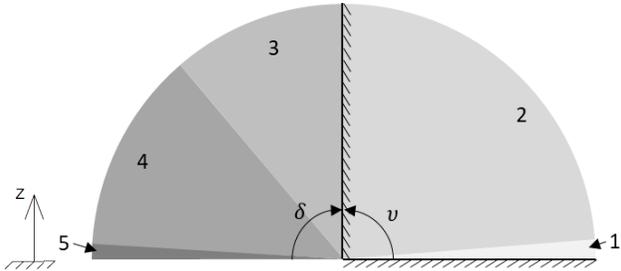
Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Planung des Bauzyklus	Positionierung im Bauraum	40			<p>Der Abstand g zwischen mehreren Bauteilen ist so groß zu wählen, dass diese nicht miteinander verschmelzen.</p> <p style="text-align: center;">$g_{XY} > 0,6 \text{ mm}$</p> <p>Bei Abständen in Z-Richtung ist die Notwendigkeit von Stützstrukturen und die Vermeidung des Anbindens an deren Unterseite entsprechend Nr. 27 zu berücksichtigen.</p> <p style="text-align: center;">$g_Z \geq 0,8 \text{ mm} + \text{Stützstrukturlänge}$</p>
	Orientierung im Bauraum	41			<p>Die Oberflächenrauheit ist unter anderem abhängig von der Orientierung der Fläche.</p> <p>$Ra = 5 \mu\text{m}$ bis $57 \mu\text{m}$; Rt bis zu $400 \mu\text{m}$</p> <p>Folgende Effekte treten bereichsweise auf.</p> <p>1 ($\nu = 1^\circ$ bis 5°): $Ra = 5 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$ + Treppenstufenwelligkeit</p> <p>2 ($\nu = 5^\circ$ bis 90°): $Ra = 20 \mu\text{m}$ bis $30 \mu\text{m}$</p> <p>3 ($\delta = 90^\circ$ bis 50°): $Ra = 30 \mu\text{m}$ bis $40 \mu\text{m}$</p> <p>4 ($\delta = 50^\circ$ bis 5°): $Ra = 30 \mu\text{m}$ bis $40 \mu\text{m}$ + angesintertes Material</p> <p>5 ($\delta = 5^\circ$ bis 0°): Treppenstufenwelligkeit + angesintertes Material</p>

Tabelle 32 Konstruktionsempfehlungen zur additiven Fertigung mittels EBM und Ti6Al4V (Fortsetzung)

Gliederungsteil		Nr.	Ungünstig	Günstig	Werte, Erläuterungen und Hinweise
Planung des Bauzyklus	Orientierung im Bauraum	Überhänge	42		<p>Überhänge weisen an deren Unterseite zusätzlich angesintertes, teils geschmolzenes Material auf, welches Abweichungen hervorruft. Der Materialzuwachs beträgt durchschnittlich bis zu 0,4 mm an bauebeneparallelen Überhangflächen. Diese Formabweichungen treten sowohl mit als auch ohne Stützstruktur auf.</p>
		Aufbauhöhe	43		<p>Die Aufbauhöhe ist möglichst gering zu halten, da dies zu einer kosteneffizienteren Fertigung führt.</p>
		Allgemeine Anmerkungen	44	<p>Das vorrangige Optimierungsziel für einen effizienten EBM-Prozess ist zumeist eine geringe Bauhöhe. Dies ist begründet durch eine geringe Menge freistehender und einfach zu entfernender Stützstrukturen, eine typischerweise verzugsfreie Fertigung sowie geringe Materialeigenschaftsänderungen bei der Bauteilumorientierung. Ferner erhöht der Vorheizschritt jeder Schicht die Bauzyklusdauer. Eine geringe Anzahl großer Schmelzflächen kann in Summe schneller prozessiert werden als eine hohe Menge kleiner Flächen. Bei überhängenden Strukturen sind die unter Nr. 42 genannten Formabweichungen zu berücksichtigen.</p>	

