

# **Herstellung laser-strahlgeschmolzener Verzahnungen in Leichtbauweise aus Einsatzstahl**

Matthias Moritz Schmitt

Vollständiger Abdruck der von TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität  
München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr. Peter Mayr
3. Prof. Dr. Christian Seidel

Die Dissertation wurde am 30.08.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und  
durch die TUM School of Engineering and Design am 15.01.2024 angenommen.



# Geleitwort der Herausgeber

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

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

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenz-basierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

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

*Gunther Reinhart*

*Rüdiger Daub*

*Michael Zäh*



---

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV in Augsburg sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München. Ich möchte mich bei allen herzlichen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für die wohlwollende Unterstützung dieser Arbeit sowie für die kontinuierliche Förderung meiner Tätigkeit am Institut. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. techn. Peter Mayr von der Technischen Universität München und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Seidel von der Technischen Hochschule München für die Übernahme des Korreferats. Ebenso gilt mein Dank Herr Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl der Technischen Universität München für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. Tobias Kamps und Dr.-Ing. Matthias Schneck bedanken. Darüber hinaus gilt ein besonderer Dank allen Studierenden, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben. Außerdem möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die meine Zeit am Institut zu einem ganz besonderen Lebensabschnitt für mich machten. Insbesondere den Kollegen der V13 danke ich für die fachlichen Diskussionen und gegenseitige Unterstützung.

Ohne den bedingungslosen Rückhalt und die Unterstützung durch meine Freundin und meine Familie wäre diese Arbeit sicherlich nicht möglichen gewesen. Für die stetige Motivation und Verständnis in diesen Zeiten bin ich sehr dankbar.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>XI</b>
<b>Definitionen.....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit .....	3
1.3 Vorgehen und Einordnung in die Design Research Methodology .....	5
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>9</b>
2.1 Leichtbaustrategien und Bauweisen .....	9
2.2 Verzahnungstechnik .....	11
2.2.1 Fertigung und Wärmebehandlung metallischer Verzahnungen.....	13
2.2.2 Auslegungskenngrößen.....	17
2.2.3 Leichtbau in Zahnrädern.....	21
2.3 Prozesskettengestaltung und Wechselwirkungen .....	24
2.4 Laser-Strahlschmelzen.....	25
2.4.1 Verfahrensablauf.....	26
2.4.2 Modellvorstellung im Schmelzbad .....	28
2.4.3 Herausforderungen und Anwendungsbeispiele .....	32

---

<b>3</b>	<b>Stand der Technik und Forschung.....</b>	<b>34</b>
3.1	Strukturelemente und Leichtbau im Laser-Strahlschmelzen .....	34
3.2	Verarbeitung von Einsatzstählen im Laser-Strahlschmelzen.....	37
3.3	Einflussfaktoren auf die Materialeigenschaften im Laser- Strahlschmelzen.....	41
3.3.1	Fertigungsbedingte Einflüsse auf die Materialeigenschaften...43	
3.3.2	Geometriebedingte Einflüsse auf die Materialeigenschaften...44	
3.4	Tragfähigkeit von additiv gefertigten Verzahnungen .....	45
3.5	Fazit und Handlungsbedarf .....	46
<b>4</b>	<b>Werkstoff, Anlagentechnik und Zahnrad-Design .....</b>	<b>49</b>
4.1	Werkstoff 16MnCr5 .....	49
4.2	Verwendete Anlagentechnik .....	52
4.3	Auslegung und Design der Leichtbauverzahnungen.....	53
<b>5</b>	<b>Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes .....</b>	<b>57</b>
5.1	Anforderungsdefinition und Merkmalermittlung .....	58
5.2	Vorversuche durch Einzelpurexperimente.....	60
5.3	Vorgehen zur Ermittlung eines Parametersatzes für Vollmaterial.....	62
5.4	Vorgehen zur Entwicklung eines angepassten Parametersatzes für dünne Strukturen .....	67
5.5	Vorgehen zur Entwicklung eines Parametersatzes für Supportstrukturen .....	70
5.6	Technisch-wirtschaftliche Bewertung.....	77
5.7	Analyse der As-built-Eigenschaften und Einordnung nach ISO 6336-5 .....	78

5.8	Fazit .....	81
<b>6</b>	<b>Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette .....</b>	<b>83</b>
6.1	Aufstellen der Prozesskette .....	84
6.2	Identifikation der zu variierenden Prozessgrößen im Laser-Strahlschmelzen und Wechselwirkungen entlang der Prozesskette ...	85
6.3	Bestimmung der Eigenschaften nach dem Laser-Strahlschmelzen und nach dem Einsatzhärten .....	87
6.3.1	Einfluss der Art des Schutzgases .....	87
6.3.2	Einfluss der Bauplattentemperatur .....	90
6.3.3	Einfluss der Scanstrategie.....	92
6.4	Quantifizierung der Wechselwirkungen und Bewertung der Wirtschaftlichkeit .....	93
6.5	Analyse der einsatzgehärteten Eigenschaften und Einordnung nach ISO 6336-5.....	95
6.6	Fazit .....	97
<b>7</b>	<b>Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen.....</b>	<b>99</b>
7.1	Einflüsse auf die Bauteildichte .....	100
7.2	Einflüsse auf die Maßhaltigkeit .....	103
7.3	Festigkeitskennwerte .....	108
7.4	Prüfung von AM-Verzahnungen .....	112
7.5	Analyse der Bauteileigenschaften und Einordnung nach ISO 6336-5 .....	122
7.6	Konstruktions- und Fertigungsrichtlinien.....	123
7.7	Fazit .....	127



---

<b>8</b>	<b>Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens.....</b>	<b>130</b>
8.1	Potenzialidentifikation.....	130
8.2	Vorversuche Pulverwerkstoff.....	133
8.3	Bestimmung der Verarbeitbarkeitsgrenze und der Materialeigenschaften .....	135
8.3.1	Verarbeitbarkeitsgrenzen.....	135
8.3.2	Resultierende Materialeigenschaften des Werkstoffs hergestellt durch In-situ-Legieren .....	137
8.4	Multimaterialverarbeitung und Aufbaustrategien .....	139
8.5	Verzahnung mit bereichsflexiblem Kohlenstoffgehalt .....	142
8.6	Fazit .....	144
<b>9</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>145</b>
9.1	Analyse der Leichtbauweisen und Auswahl geeigneter Prozessketten .....	145
9.2	Analyse der Herstellungskosten .....	147
9.3	Bewertung der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der Leichtbauweise .....	152
9.4	Fazit .....	156
<b>10</b>	<b>Schlussbetrachtung.....</b>	<b>158</b>
10.1	Zusammenfassung .....	158
10.2	Diskussion .....	160
10.3	Ausblick.....	162

<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>164</b>
<b>12</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>199</b>
<b>13</b>	<b>Studienarbeiten .....</b>	<b>215</b>



## Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
A <sub>c1</sub>	Temperatur zu Beginn der Austenitbildung
A <sub>c3</sub>	Umwandlungstemperatur von Ferrit nach Austenit
AM	Additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing)
bcc	kubisch raumzentriert
BESO	Bidirectional Evolutionary Structural Optimization
BioTRIZ	Bionische Entwicklungsmethode basierend auf TRIZ
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design
DfAM	Design for Additive Manufacturing
CHD	Einsatzhärtetiefe
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DRM	Design Research Methodology
EOS	Electro Optical Systems
ESO	Evolutionary Structural Optimization
fcc	kubisch flächenzentriert
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau
i. O.	in Ordnung
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LB	Leichtbau

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

LBM	Laser-Strahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting)
m	Masse
Ma.-%	Masseprozent
ME	Materialklasse für Verzahnungen; Anforderungen an Materialqualität und Wärmebehandlung, wenn ein höchstes Maß an Betriebssicherheit gefordert ist
ML	Materialklasse für Verzahnungen; geringe Anforderungen an Materialqualität und Wärmebehandlung
MQ	Materialklasse für Verzahnungen; Anforderungen an Materialqualität und Wärmebehandlung, die von erfahrenen Herstellern unter moderaten Kosten erfüllt werden
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
opt.	optimiert
PBF-LB/M	Laserbasiertes Schmelzen mittels Laserstrahl von Metall, auch Laser-Strahlschmelzen
ppm	part per million
rel.	relativ
RoI	Return-on-Investment
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STL	Surface Tesselation Language
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens
Typ-1	schrägverzahnte Verzahnungsgeometrie für Versuche am FZG-Zahnradverspannungsprüfstand (praxisnahe Schrägverzahnung)
z. B.	zum Beispiel

## Verzeichnis der Formelzeichen

### Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	%	Bruchdehnung
B <sub>S</sub>	µm	Schmelzbadbreite
C <sub>B</sub>	mm	Breite des Schachbretts
C <sub>eq</sub>	%	Kohlenstoffäquivalent
C <sub>p</sub>	%	Kohlenstoffpegel
D <sub>B</sub>	mm	Bohrungsdurchmesser
D <sub>C</sub>	m <sup>2</sup> /s	Diffusionskoeffizient
D <sub>D,Innen</sub>	mm	Innendurchmesser Designraum
D <sub>D,Außen</sub>	mm	Außendurchmesser Designraum
D <sub>F</sub>	mm	Fußkreisdurchmesser
D <sub>K</sub>	mm	Kopfkreisdurchmesser
E <sub>S</sub>	W s/mm	Streckenenergie
E <sub>v</sub>	J/mm <sup>3</sup>	Energiedichte
F <sub>t</sub>	N	Nenn-Umfangskraft
F <sub>Pn</sub>	kN	Pulsatornormalkraft
F <sub>Pn∞,50%</sub>	kN	Pulsatornormalkraft bei 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit
G	K/s	Temperaturgradient
H	µm	Schichtstärke
K <sub>A</sub>	-	Anwendungsfaktor
K <sub>chem. Polieren</sub>	€	Kosten für das chemische Polieren
K <sub>Drehen</sub>	€	Kosten für das Drehen

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$K_{\text{Erodieren}}$	€	Kosten für das Erodieren der Bauplattform
$K_{\text{Einsatzhärten}}$	€	Kosten für das Einsatzhärten
$K_{H\alpha}$	-	Stirnfaktor
$K_{\text{Härten}}$	€	Kosten für das Härten
$K_{H\beta}$	-	Breitenfaktor
$K_{\text{Prozessschritt}}$	€	Kosten des Prozessschritts
$K_{\text{Schleifen}}$	€	Kosten für das Schleifen
$K_{\text{LB1}}$	€	Kosten der Leichtbauvariante 1
$K_{\text{LB2}}$	€	Kosten der Leichtbauvariante 2
$K_{\text{LB3}}$	€	Kosten der Leichtbauvariante 3
$K_{\text{LB4}}$	€	Kosten der Leichtbauvariante 4
$K_{\text{LBM}}$	€	Kosten für das Laser-Strahlschmelzen
$K_{\text{Spanen}}$	€	Kosten für die spanende Fertigung
$K_{\text{Spannungsarm-glühen}}$	€	Kosten für das Spannungsarmglühen
$K_{\text{Support}}$	€	Kosten für die Supportentfernung
$K_{\text{Trennen}}$	€	Kosten das Abtrennen des Rohmaterials
$K_{\gamma}$	-	Aufteilungsfaktor
$K_v$	-	Dynamikfaktor
$K_{\text{Wälzfräsen}}$	€	Kosten für das Wälzfräsen
$M_{\text{an}}$	Nm	Antriebsdrehmoment
$M_{\text{ab}}$	Nm	Abtriebsdrehmoment
$N$	-	Lastspielzahl
$NB$	mm	Nutbreite
$P_B$	W	Laserleistung des Vollmaterialparameters

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$P_L$	W	Laserleistung
$P_r$	W	Reduzierte Laserleistung
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
R	-	Wachstumsrate
$R_a$	$\mu\text{m}$	Mittenrauwert
$R_m$	$\text{N}/\text{mm}^2$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	0,2 % Dehngrenze
$R_z$	$\mu\text{m}$	Gemittelte Rautiefe
$S_F$	-	Sicherheitsfaktor
$T_1$	Nm	Drehmoment am Ritzel
$T_{1\infty,50\%}$	Nm	dauerfest ertragbares Ritzeldrehmoment
$T_p$	$^{\circ}\text{C}$	Bauteiltemperatur
$T_{\text{Prüf,max}}$	Nm	maximales Prüfdrehmoment
$T_S$	$\mu\text{m}$	Schmelzbadtiefe
$T_x$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur am Punkt x
$V_{\text{Gesamt}}$	$\text{mm}^3$	Gesamtvolumen
$V_{16\text{MnCr5}}$	$\text{mm}^3$	Volumen aus 16MnCr5
$V_{16\text{MnCr5+C}}$	$\text{mm}^3$	Volumen aus 16MnCr5 mit Kohlenstoff
$Y_B$	-	Zahnkranzdickenfaktor
$Y_{\beta}$	-	Schrägungsfaktor
$Y_{\delta\text{relT}}$	-	relative Stützziffer
$Y_{DT}$	-	Hochverzahnungsfaktor
$Y_F$	-	Formfaktor
$Y_{\text{RelT}}$	-	relativen Oberflächenfaktor
$Y_S$	-	Spannungskorrekturfaktor



## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$Y_{ST}$	-	Spannungskorrekturfaktor des Prüfrads
$Y_X$	-	Größenfaktor
$Z_\beta$	-	Schrägenfaktor
$Z_D$	mm	Einzeleingriffsfaktor des Rads
$Z_E$	$\frac{\sqrt{N}}{mm}$	Elastizitätsfaktor
$Z_\varepsilon$	-	Überdeckungsfaktor
$Z_H$	-	Zonenfaktor
$Z_L$	-	Schmierstofffaktor
$Z_R$	-	Rauheitsfaktor
$Z_V$	-	Geschwindigkeitsfaktor
$Z_W$	-	Faktor der Werkstoffpaarung
$Z_X$	-	Größenfaktor

### Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
b	mm	Breite der Verzahnung
$b_w$	mm	Perforationsdicke
$d_1$	mm	Teilkreisdurchmesser
$d_F$	$\mu\text{m}$	Fokusbereich
$d_S$	mm	Querschnitt einer Struktur
$f_{1\%}$	-	Umrechnungsfaktor von 50% auf 1% Ausfallwahrscheinlichkeit der Tragfähigkeit
$f_{1\%H}$	-	Umrechnungsfaktor von 50% auf 1% Ausfallwahrscheinlichkeit der Flankenpressung
h	$\mu\text{m}$	Spurabstand

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$h_G$	mm	Gitterabstand des Supports
$h_p$	mm	Bauteilhöhe
$h_t$	mm	Zahnhöhe
$i$	-	Übersetzungsverhältnis
$l_{s-nom}$	mm	nomielle Länge eines Scanvektors
$l_s$	mm	Länge eines Scanvektors
$m_n$	mm	Modul
$n_{ab}$	1/s	Abtriebsdrehzahl
$n_{an}$	1/s	Antriebsdrehzahl
$p$	-	Teilung
$r$	-	Reduktionsfaktor
$s$	mm	Zahndicke
$s_a$	mm	Zahndicke am Kopf
$s_h$	mm	Höhe des VollsUPPORT
$s_R$	mm	Zahnkranzdicke
$u$	-	Zähnezahlverhältnis
$v_{ph}$	mm	Höhe der Perforation
$v_s$	mm/s	Scangeschwindigkeit
$v_{th}$	mm <sup>3</sup> /s	theoretische Aufbaurrate
$z$	-	Zähnezahl

### Griechische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha_n$	°	Normaleingriffswinkel
$\beta$	m/s	Kohlenstoffübergangszahl

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$\gamma$ -Phase	-	Austenit-Phase in Stählen
$\rho_{\text{rel}}$	%	relative Bauteildichte
$\eta$	-	Wirkungsgrad
$\sigma_{B0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2%-Biegesteifigkeit
$\sigma_{D0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	0,2%-Drucksteifigkeit
$\sigma_F$	N/mm <sup>2</sup>	Zahnfußspannung
$\sigma_{F0}$	N/mm <sup>2</sup>	nominelle Zahnfußspannung
$\sigma_{F0,\infty,50\%}$	N/mm <sup>2</sup>	Zahnfußspannung bei 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit
$\sigma_{\text{Flim},1\%}$	N/mm <sup>2</sup>	Zahnfußdauerfestigkeit
$\sigma_{H0}$	N/mm <sup>2</sup>	nominelle Flankenpressung
$\sigma_{H0,\infty,50\%}$	N/mm <sup>2</sup>	nominelle Flankenpressung bei 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit
$\sigma_{\text{Hlim},1\%}$	N/mm <sup>2</sup>	Dauerfestigkeit der Flankenpressung
$\sigma_S$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit Supportstrukturen
$\tau_S$	N/mm <sup>2</sup>	Schubfestigkeit Supportstrukturen
$\omega_{\text{ab}}$	1/s	Abtriebswinkelgeschwindigkeit
$\omega_{\text{an}}$	1/s	Antriebswinkelgeschwindigkeit
$\Delta$	-	Differenz

## Definitionen

Die zentralen Begriffe und deren spezifische Definition im Kontext dieser Arbeit werden im folgenden erläutert um das Verständnis der Arbeit zu erleichtern.

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
Additive Fertigung	Übergreifender Begriff für Fertigungstechnologien, die Material sukzessive hinzufügen, um ein dreidimensionales physisches Objekt herzustellen (DIN EN ISO/ASTM 52900-06)
Bauweise	Geometrische Umsetzung des Leichtbaus und die resultierende Anordnung von Konstruktions- und Formelementen (HENNING & MOELLER 2020)
Einflussgröße	Veränderliche oder unveränderliche Randbedingung oder Parameter, welche die Qualität eines Fertigungsprozesses beeinflussen (BRACKE 2016)
Einsatzstahl	Niedriglegierter Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,15 bis 0,25 Ma.-%; durch das Einsatzhärten kann eine harte Randschicht mit einem duktilen Kerngefüge kombiniert werden (BARGEL & SCHULZE 2018)
Kohlenstoffpegel	Parameter zur Regelung des Aufkohlungsvorgang, der erreicht ist wenn ein Gleichgewicht zwischen dem Kohlenstoffgehalt des umgebenden Mediums und dem Kohlenstoffgehalt des Werkstücks erzielt ist (LIEDTKE 2008)
Konventionelle Fertigung	Fertigungstechnologien außerhalb der Gruppe 1.10 ‚Urformen durch Additive Fertigung‘ der DIN 8580 (DIN 8580-1)
Laser-Strahlschmelzen	Additiver Fertigungsprozess in dem mittels eines Laserstrahls eine Schicht aus Metallpulver selektiv aufgeschmolzen wird um schichtweise ein Bauteil zu erzeugen (VDI 3405)
Leichtbau	Zielstellung ein Bauteil minimaler Masse zu entwickeln ohne die Belastbarkeit unter dem gegebenen Lastkollektiv

## Definitionen

---

	(elastomechanisch, -thermisch und dynamisch) zu überschreiten (KLEIN 2013, LINKE & NAST 2015)
Parametersatz	Enthält die Information über die verwendete Kombination der Fertigungsparameter im Laser-Strahlschmelzen. Ein Parametersatz beinhaltet in der Regel Informationen zu Schichtstärke, Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatchabstand.  Im Zuge dieser Arbeit wird damit verdeutlicht, dass eine Kombination an Fertigungsparametern notwendig ist um das Laser-Strahlschmelzen zu beschreiben.
Schmelzmetallurgisch	Beschreibung eines Werkstoffs aus einer Fertigungsroute, die einen Gußprozess zur Rohmaterialerzeugung enthält (BARGEL & SCHULZE 2018); Verwendung als Abgrenzung zu additiv hergestelltem Werkstoff
Steuergrößen	Parameter einer Untersuchung, welcher variiert wird um einen Effekt auf die Zielgröße zu erreichen (WITELSKI & BOWEN 2015)
Wechselwirkung	Gegenseitige Beeinflussung von Prozessen innerhalb einer Prozesskette (ZOCH 2009)
Zielgröße	Beeinflusstes Merkmal und Untersuchungsgegenstand des Experiments oder der Fragestellung (WITELSKI & BOWEN 2015)

### Gleichstellung der Geschlechter

In dieser Arbeit wird abwechselnd die weibliche und männliche Sprachform verwendet. Dies dient der Gleichstellung der Geschlechter (m/w/d) bei gleichzeitiger Beibehaltung eines hohen Maßes an Lesbarkeit. Sämtliche Bezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die additive Fertigung (engl. additive manufacturing, AM) bietet Produktentwicklerinnen neue Möglichkeiten bei der Gestaltung von Bauteilen und der Umsetzung von komplexen Strukturen (GEBHARDT 2016). Die Verfahren befähigen innovative Leichtbaukonzepte und die Integration von Bauteilen sowie Funktionen, die als Wettbewerbsvorteil genutzt werden (LANZA ET AL. 2017). Neben den funktionalen Vorteilen des Leichtbaus rückt die Reduzierung des Materialeinsatzes in der Produktion und die Reduktion von Emissionen (z. B. CO<sub>2</sub>-Äquivalent) in der Nutzungsphase in den Vordergrund (SEELIGER 2021). Der ermöglichte Leichtbau durch den Einsatz der additiven Fertigung reduziert dabei den Materialeinsatz in der Produktion indem Bauteile endkonturnah gefertigt werden und anschließend nur eine minimale Zerspanung notwendig ist (YADROITSEV ET AL. 2021).

Den Vorteilen der additiven Fertigung stehen, wie jedem Fertigungsverfahren, auch Einschränkungen und Nachteile gegenüber. Die Verfahren der additiven Fertigung besitzen in der Regel eine geringere Produktivität im Vergleich zu Fertigungsverfahren wie dem Gießen. Dadurch entstehen für die Großserie hohe Stückkosten. Allerdings wird bei der additiven Fertigung keine Form benötigt, was vorteilhaft bei kleinen Stückzahlen ist. Des Weiteren benötigen additiv gefertigte Produkte eine Nacharbeit um Maßhaltigkeit und Genauigkeiten von Fertigungsverfahren wie dem Zerspanen zu erreichen (GEBHARDT 2016). Außerdem ist zur Herstellung der verwendeten Ausgangsstoffe, wie metallischen Pulvern, ein hoher Energieeinsatz notwendig (LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018a). Darüber hinaus weisen additive Fertigungsverfahren als „junge“ Gruppe der Fertigungsverfahren noch eine geringe Technologiereife auf und es mangelt an Wissen in den Unternehmen um, besonders metallische, additive Fertigungstechnologien zielgerichtet einsetzen zu können (SCHNECK 2021). Die industrielle Implementierung der additiven Fertigung erfordert daher eine ganzheitliche Bewertung der Vor- und Nachteile und benötigt die Einbindung in eine Prozesskette mit weiteren Fertigungsverfahren.

Das Laser-Strahlschmelzen eignet sich zur Herstellung metallischer Bauteile und ist aktuell das bedeutendste metallische additive Fertigungsverfahren (WOHLERS 2021). In der Medizintechnik sowie in der Luft- und Raumfahrt wird die Technologie bereits für die Fertigung von komplexen Einzelstücken und Kleinserien

eingesetzt. Mit steigender Reife der Technologie und des Ökosystems wird langfristig ein Wandel von der Prototypenfertigung, Ersatzteilversorgung und der Kleinserienfertigung hin zum Einsatz in der Serienproduktion prognostiziert (WORLD ECONOMIC FORUM 2022). Dies zeigt sich in jährlichen Wachstumsraten von mehr als 10 % und sinkenden Fertigungskosten (WOHLERS 2021). Der Einsatz des Laser-Strahlschmelzens für die (Klein-)Serienproduktion bringt, neben der Produktivität, Herausforderungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität mit sich, die gelöst werden müssen (LANZA ET AL. 2017, HAECKEL ET AL. 2017). Dem gegenüber steht das Potenzial der Technologie, eine flexible und werkzeuglose Fertigung von funktionsoptimierten Bauteilen zu ermöglichen, um volatilen Märkten zu begegnen. So wird im Automobilbau durch den Wandel zu elektrischen Antrieben die Gestaltung einer ressourceneffizienten Produktion und entsprechenden Produkten als eine Chance für die metallische additive Fertigung gesehen (CHARLES ET AL. 2022). Die additive Fertigung trägt durch die Umsetzung von Leichtbauprinzipien zur Einhaltung von Emissionsgrenzwerten bei.

Im Automobilbau verschiebt sich der Blickwinkel für Leichtbauanwendungen von klassischen Strukturbauteilen zu hochbelasteten Bauteilen im Antriebsstrang. Neben der Masse- und Emissionsreduktion lassen sich weitere Vorteile durch die Verringerung der rotierenden Massen und Trägheitsmomente sowie durch Geräusch- und Verschleißminderung erzielen (POLITIS ET AL. 2021). Insbesondere in Verzahnungen wird trotz des bereits hohen Wirkungsgrads stetig nach innovativen Leichtbaukonzepten und Möglichkeiten zur Funktionserweiterung gesucht (STAHL 2014). Mit konventionellen Ansätzen zur Umsetzung von Leichtbaukonzepten für Verzahnungen, bestehend aus Umform- und Fügeprozessen, gelingt es nicht, die Anforderungen an die Tragfähigkeit zu erfüllen (LEONHARDT ET AL. 2020). Das Laser-Strahlschmelzen bietet sich als Technologie mit verbesserter Formfreiheit und verringerten Fertigungsrestriktionen an, um die notwendigen Leichtbaukonzepte und Funktionserweiterungen umzusetzen. Gleichzeitig soll in der Zahnradfertigung die Nachhaltigkeit verbessert werden. Verfahren ohne hohen Materialabtrag, wie bei einer endkonturnahen Herstellung durch additive Fertigungsverfahren, wird nach GUPTA ET AL. großes Potenzial zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele zugeschrieben (GUPTA ET AL. 2016).

Die Fertigung von Verzahnungen durch das Laser-Strahlschmelzen und die Beherrschung der zugehörigen Prozesskette stellen die Anwender vor Herausforderungen. Selbiges gilt für die Auslegung von Leichtbauverzahnungen, da bestehende Normen und Richtlinien nicht ausreichend sind. Eine Vorgehensweise zur Auslegung von funktionsintegrierten Verzahnungen stellt KAMPS dar, beschreibt

gleichzeitig aber auch reduzierte Tragfähigkeiten (KAMPS 2018). Durch eine ungenügende Prozessführung und -kette wurden nur 50 % der Referenztragfähigkeit von laser-strahlgeschmolzenen Verzahnungen aus 16MnCr5 durch KONOWALCZYK ET AL. und später durch KLEE & LANTZSCH erzielt (KONOWALCZYK ET AL. 2017, KLEE & LANTZSCH 2021). Es zeigt sich ein uneinheitliches Bild für Anwenderinnen. Einerseits sind mehr als 150 Einflussfaktoren auf das Laser-Strahlschmelzen bekannt, deren Zusammenwirken allerdings noch nicht ausreichend erforscht ist (REHME 2009, KRAUSS 2016), andererseits sind für komplexe Geometrien angepasste Fertigungsparameterkombinationen und Kenntnisse über die Materialeigenschaften notwendig (MERKT 2015). Ohne dieses Wissen ist eine sichere Auslegung von laser-strahlgeschmolzenen Bauteilen, gerade für dynamische Belastungen in Verzahnungen, nicht möglich (BARBA ET AL. 2020).

Herausforderungen für Nutzer bestehen besonders in der Ermittlung von anwendungsspezifischen Parametersätzen und der Beherrschung der komplexen Prozesskette. Vor allem zur Umsetzung von Leichtbauansätzen, die eine nahezu vollständige Ausnutzung der Materialkennwerte voraussetzen, sind Herausforderungen zu überwinden, um das Laser-Strahlschmelzen als Produktionsverfahren zu etablieren.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Herstellung von geometrisch komplexen leichtbauoptimierten Verzahnungen mittels Laser-Strahlschmelzen stellt für Anwender eine Herausforderung dar. Diese besteht aus noch ungenügenden Erkenntnissen zur Prozessführung im Laser-Strahlschmelzen (angepasster Parametersatz, Wirkung der Einflussfaktoren) und aus Wechselwirkungen entlang der Prozesskette (Verzug und Materialeigenschaften nach einer Wärmebehandlung). Die Prozesskette zur Herstellung von leichtbauoptimierten Verzahnungen ist in Abbildung 1 dargestellt.

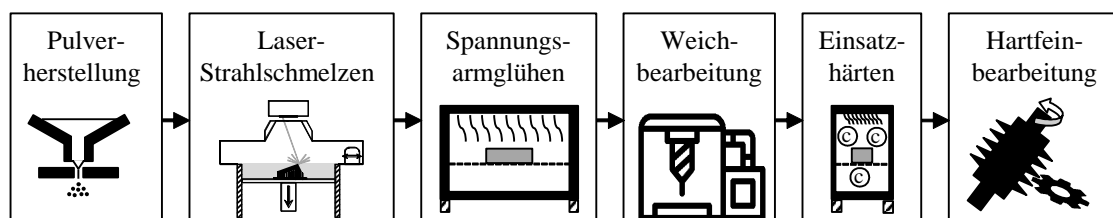


Abbildung 1: Prozesskette für das Laser-Strahlschmelzen von Verzahnungen

Ausgangspunkt ist die Herstellung des metallischen Pulvers für das Laser-Strahlschmelzen. Im Laser-Strahlschmelzen ist eine optimale Prozessführung notwendig, da hier die Grundlage über die Bauteildichte für eine anforderungsgerechte



Materialqualität gelegt wird. In den darauffolgenden Prozesskettenschritten ist eine Beherrschung des Verzugs und Einstellung der Randschichteigenschaften unerlässlich um belastbare Verzahnungen zu generieren. Über die spanenden Fertigungsschritte wird die geometrische Endkontur der Bauteile erzeugt, welches eine Datenbasis über die Genauig- und Maßhaltigkeit des Laser-Strahlschmelzens erfordert. Zusätzlich sind die erzielbaren Ergebnisse bezüglich der Reproduzierbarkeit der geometrischen Eigenschaften und Materialkennwerte in einer (Klein-)Serienfertigung nicht bekannt.

Zielstellung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Vorgehens zur Herstellung laser-strahlgeschmolzener Verzahnungen in Abhängigkeit von ihrer Leichtbauweise. Im Fokus stehen dabei Strukturen, die für Leichtbauzwecke eingesetzt werden, z. B. topologieoptimierte Geometrien oder Gitterstrukturen. Das Vorgehen wird anhand von leichtbauoptimierten Verzahnungen aus dem Einsatzstahl 16MnCr5 entwickelt und es werden experimentelle Untersuchungen für diese Kombination durchgeführt. Die erzielten Materialkennwerte und Tragfähigkeitswerte der AM-Verzahnungen werden in die ISO 6336-5 eingeordnet, um Anwenderinnen Auslegungskennwerte zur Verfügung zu stellen. Eine Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle und Verzahnungsgeometrien wird durch die Allgemeingültigkeit der Vorgehensweise und normgerechte Kennwertermittlung ermöglicht. Im Vergleich zur Trial-and-Error-Methode wird der Aufwand für Anwender durch diese Vorgehensweise und Handlungsempfehlungen reduziert.

Folgende Forschungsfragen gilt es zur Zielerreichung zu beantworten:

- Wie lassen sich Fertigungsparameterkombinationen anwendungs- und bauweisspezifisch entwickeln?
- Wie lassen sich Wechselwirkungen entlang der Prozesskette inklusive einer Wärmebehandlung quantifizieren und Prozessgrößen anwendungsspezifisch auswählen?
- Welche Materialqualität und Tragfähigkeit von leichtbauoptimierten Verzahnungen können im Laser-Strahlschmelzen erreicht werden?
- Welche Vorteile lassen sich durch die Multimaterialbauweise für Leichtbauverzahnungen erzielen und wie können diese umgesetzt werden?

Durch das Ergebnis der Arbeit soll die Sicherheit in der Fertigung von komplexen leichtbauoptimierten Verzahnungen erhöht, der Aufwand in der Prozessentwicklung reduziert und so der breite industrielle Einsatz des Laser-Strahlschmelzens vorangetrieben werden.

### 1.3 Vorgehen und Einordnung in die Design Research Methodology

Die Vorgehensweise in der Arbeit und die Einordnung nach der **Design Research Methodology (DRM)** von BLESSING & CHAKRABARTI sind in Abbildung 2 dargestellt (BLESSING & CHAKRABARTI 2009). Unter Design werden dabei die Aktivitäten bezeichnet, mit denen ein Produkt aus einem Bedarf, einer Idee oder einer Technologie generiert und entwickelt wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Entwicklung und die Herstellung von Leichtbauverzahnungen betrachtet, wodurch die Anwendung der DRM zu bevorzugen ist. Die Forschungsfragen adressieren Problemstellungen innerhalb der Designentwicklung wodurch die DRM als Vorgehensmethode gut geeignet ist, da ein konkreter Produktbezug vorliegt. Gleichzeitig wird durch die Nutzung der DRM der Transfer von wissenschaftlichen Ergebnissen zu praktischen Anwendungen unterstützt. Verknüpfung und Inhalte der einzelnen Kapitel werden im Folgenden beschrieben.

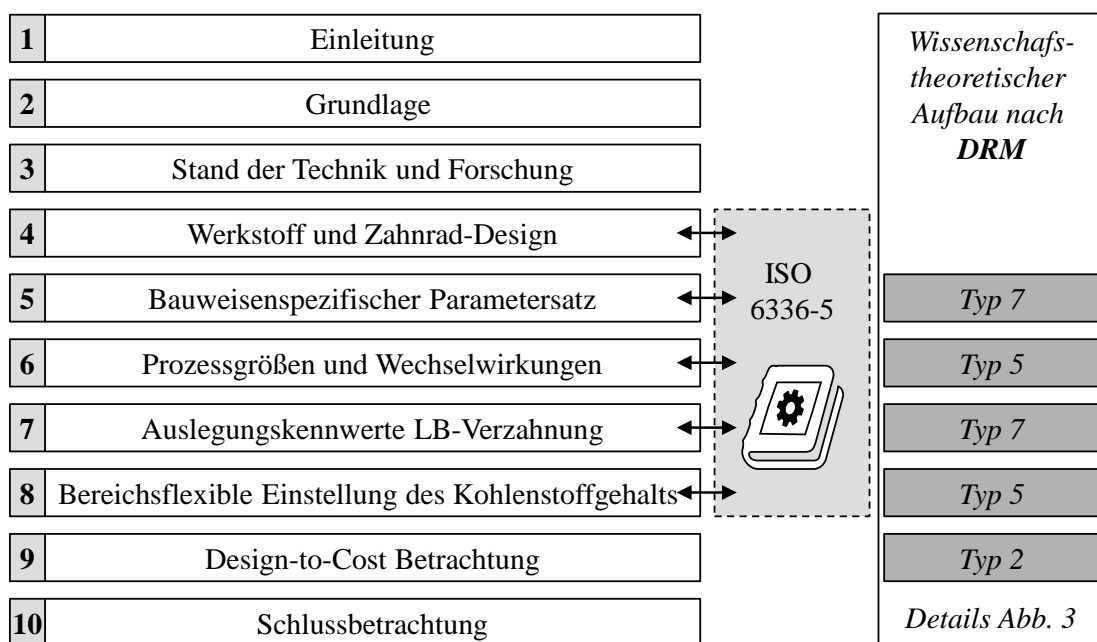


Abbildung 2: Vorgehensweise in der Arbeit und Einordnung in das DRM

Ziel der Arbeit ist es, durch die wissenschaftliche Durchdringung der komplexen Zusammenhänge ein tiefergehendes Verständnis der Wirkzusammenhänge des Laser-Strahlschmelzens von komplexen Leichtbaustrukturen für Verzahnungen aufzubauen und Anwenderinnen eine Vorgehensweise zur individuellen Nutzung sowie Handlungsempfehlungen zur Herstellung von Leichtbauverzahnungen zu geben. Dabei orientiert sich die Arbeit an der **DRM** und den übergeordneten Zielen „provide understanding and support“ (BLESSING & CHAKRABARTI 2009).

Das methodische Vorgehen der **DRM** folgt vier übergeordneten Phasen beginnend mit der *Research Clarification*, gefolgt von der *Descriptive Study I*, der *Prescriptive Study* und wird abgeschlossen durch die *Descriptive Study II*. Die Phasen werden nacheinander durchlaufen, erlauben aber auch einen Rückfluss an Informationen zu vorherigen Phasen. Ergebnis der ersten Phase ist die Formulierung einer realistischen Zielstellung, welche durch erste Hinweise und Annahmen z. B. aus der Literatur ein lohnenswertes Forschungsziel darstellt. In der Regel enthält dieser Schritt eine Literaturrecherche (*review*). Der nächste Schritt ist eine *Descriptive Study I* mit dem Ziel Wissen und Verständnis aufzubauen. In dieser Phase finden die experimentellen Untersuchungen oder Auswertungen von Daten statt. Dieses erworbene Wissen wird in der nächsten Phase der *Prescriptive Study* genutzt, um eine Lösung der Problemstellung oder eine Vorgehensweise zur Unterstützung des Anwenders zu erarbeiten. Ob die Unterstützung die gewünschte Wirkung hat, ist jedoch in dieser Phase noch nicht klar, da diese auf vielen Annahmen basiert. Eine Evaluierung der Lösung oder der entwickelten Vorgehensweise erfolgt in der abschließenden Phase *Descriptive Study II*. In dieser Phase wird die Lösung kritisch bewertet. Es können weitere experimentelle Untersuchungen erfolgen oder es werden Plausibilisierungen aufgestellt. Ziel ist es mögliche Wissenslücken oder Unzulänglichkeiten zu identifizieren.

Jedes Kapitel dieser Arbeit startet mit der Phase *Research Clarification* zur Definition der Ausgangssituation und Eingrenzung des Lösungsraums. Dieser Schritt wird literaturbasiert auf Basis der Kapitel 3, 4 und 5 durchgeführt (*review-based*). Es folgt jeweils eine *Descriptive Study I*, die aus der Entwicklung der Vorgehensweise und zielgerichteten Untersuchungen (in der Regel experimentell, Kapitel 9 analytisch) besteht. Auf Basis der Erkenntnisse werden in der Phase *Prescriptive Study* Vorgehensweisen zur Unterstützung der Anwenderin in der Problemstellung des jeweiligen Kapitels abgeleitet. Abgeschlossen wird das Vorgehen durch die Phase *Descriptive Study II*, in der die Vorgehensweise und Handlungsempfehlungen evaluiert und auf die Anwendbarkeit hin bewertet werden. In den letzten drei Phasen wird zwischen einer Studie oder experimentellen Untersuchung (*comprehensive*) und einer Plausibilisierung der Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen (*initial*) unterschieden. Abbildung 3 zeigt den jeweilige wissenschaftstheoretische Aufbau der Kapitel.

	Research Clarification	Descriptive Study I	Prescriptive Study I	Descriptive Study II	Typ
Kapitel 5: Bauweisenspezifischer Parametersatz	Review-based	Comprehensive	Comprehensive	Comprehensive	7
Kapitel 6: Prozessgrößen und Wechselwirkungen	Review-based	Comprehensive	Comprehensive	Initial	5
Kapitel 7: Auslegungskennwerte LB-Verzahnung	Review-based	Comprehensive	Comprehensive	Comprehensive	7
Kapitel 8: Bereichsflexible Einstellung des C-Gehalts	Review-based	Comprehensive	Comprehensive	Comprehensive	7
Kapitel 9: Design-to-Cost Betrachtung	Review-based	Comprehensive	Initial		2

Kapitel 2, 3  
und 4

Abbildung 3 Wissenschaftstheoretischer Aufbau und Einteilung der Kapitel

BLESSING & CHAKRABARTI leiten basierend auf den durchlaufenen Phasen sieben Typen an wissenschaftlichen Vorgehensweisen basierend auf deren Hauptfokus ab. Neben dem wissenschaftstheoretischen Aufbau der Kapitel ist der jeweilige Typ der **DRM** (2, 5 bzw. 7) in Abbildung 3 dargestellt. In Kapitel 5, 7 und 8 werden die drei letzten Phasen vertieft durchgeführt und erlauben eine detaillierte Beantwortung der Forschungsfragen und Evaluierung der Handlungsempfehlungen. In Kapitel 6 werden die Handlungsempfehlungen plausibilisiert wodurch sich Typ 5 ergibt. In Kapitel 9 (Typ 2) folgt der *Describe Study I* eine initiale *Prescriptive Study I*, welche eine Analyse der Wirtschaftlichkeitsbewertung des Laser-Strahlschmelzens im Kontext von Leichtbauverzahnungen enthält. Die abgeleiteten Handlungsanweisungen aus dieser Arbeit stellen eine präskriptive Methode dar (ULRICH & HILL 1979).

In **Kapitel 2** wird das Hintergrundwissen aus den Bereichen des Leichtbaus, der Verzahnungstechnik und des Laser-Strahlschmelzens dargestellt. Basierend auf diesem werden in **Kapitel 3** die aktuellen Erkenntnisse zur Verarbeitung von Einsatzstählen und eine geometriespezifische Parameterkombinationentwicklung diskutiert, allgemeingültige Fragestellungen abgeleitet und schlussendlich der Handlungsbedarf zur Herstellung von Leichtbauverzahnungen herausgearbeitet. Die literaturbasierten Beobachtungen dienen als Input für den ersten Baustein, der *Research Clarification*, der weiteren Kapitel mit dem Ziel, eine exakte Beschreibung der Ausgangssituation zu ermöglichen, den Lösungsraum einzugrenzen und Annahmen explizit aufzustellen. Die verwendete Anlagentechnik und Informationen zum Ausgangsmaterial der experimentellen Untersuchungen sind in **Kapitel 4** zusammengefasst und dienen als Input für den zweiten Baustein, der *Descriptive Study I*. In **Kapitel 5** wird das Vorgehen zur Entwicklung eines anwendungs- und bauweisenspezifischen Parametersatzes aufgestellt und für eine Leichtbauverzahnung durchgeführt. Das Ergebnis sind Handlungsempfehlungen (Check-Listen, Probekörper, Versuchsplanung), die eine zielgerichtete Parametersatzentwicklung

unterstützen. In **Kapitel 6** werden systematisch die Einflussgrößen des Laser-Strahlschmelzens in Kombination mit dem Einsatzhärten und deren Wirkung auf den Bauteilendzustand bewertet sowie deren Wirkzusammenhänge erfasst. Die abschließende Quantifizierung der Effekte und die Bewertung dienen als Auswahlhilfe zur Prozess- und Prozesskettengestaltung. In **Kapitel 7** wird einerseits die Reproduzierbarkeit des Laser-Strahlschmelzens untersucht und bewertet, andererseits die Tragfähigkeit (Gestaltfestigkeit, Zahnfuß- und Zahnflankenuntersuchungen) von AM-Leichtbauverzahnungen ermittelt. Darauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen abgeleitet. In **Kapitel 8** werden die bisherigen Auslegungskenngrößen von Leichtbauverzahnungen durch die Möglichkeit der ortsflexiblen Einstellung des Kohlenstoffgehalts erweitert. Dazu wird evaluiert, wie mit der Multimaterialfertigung in Kombination mit einer Kohlenstoffanreicherung des Ausgangspulvers ausreichende mechanische Eigenschaften erzielt werden können. Die Erkenntnisse der Kapitel 4 bis 8 werden mit den Materialanforderungen für Zahnräder nach ISO 6336-5 verglichen und ermöglichen so eine Einordnung der erzielten Kennwerte und Eigenschaften nach einer von Anwendern anerkannten Norm. **Kapitel 9** beinhaltet eine wirtschaftliche Analyse der Fertigungskosten von Leichtbauverzahnungen in Abhängigkeit von der Leichtbauweise und der sich daraus ergebenden Prozesskette. Abschließend werden die Ergebnisse in **Kapitel 10** zusammengefasst und kritisch reflektiert. Ergänzt wird die Schlussbetrachtung um eine wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit. Der weitere Handlungsbedarf wird im Ausblick vorgestellt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Leichtbaustrategien und Bauweisen

Die Aufgabe des Leichtbaus besteht darin, ein minimales Bauteilgewicht unter maximaler Materialausnutzung zu entwickeln (HENNING & MOELLER 2020). Dabei müssen alle Querschnitte so gewählt werden, dass die auftretenden elastomechanischen, -thermischen und -dynamischen Beanspruchungen die Belastbarkeit an keiner Stelle überschreiten (LINKE & NAST 2015). Wird der Leichtbau erfolgreich eingesetzt, können nach KLEIN 2013 und POLITIS ET AL. 2021 unter anderem folgende Vorteile erzielt werden:

- Nutzlaststeigerung oder Geschwindigkeitserhöhung
- Verringerter Widerstand (z. B. Wälz- oder Beschleunigungswiderstand)
- Verringerung des Kraftstoffverbrauchs (z. B. Luft- und Raumfahrt)
- Steigerung der Effizienz (z. B. Taktzeitsteigerung in der Anlagentechnik)
- Verschiebung der Eigenfrequenzen (z. B. in Turbomaschinen)
- Sekundäre Leichtbaupotenziale in angrenzenden Baugruppen
- Verringerter Verschleiß (z. B. in der Robotik)

Insgesamt kann dadurch eine Verbesserung der ökologischen Nutzung (Reduktion CO<sub>2</sub>-Verbrauch) des Produktes während der Herstellungs- und Nutzungsphase erzielt werden. Gemäß diesem Anspruch ist der Wunsch nach einer möglichst geringen Masse ein großer Bestandteil des Zielsystems eines neuen Produktes.

Um Leichtbaustrukturen zu entwickeln, wurden verschiedene Ansätze konzipiert, die im Folgenden nach KLEIN 2013 und HENNING & MOELLER 2020 erläutert werden. Der **Bedingungsleichtbau** gibt die Anforderungen an das Produkt vor. In diesem Rahmen werden die weiteren Leichtbaustrategien **Form-, Werkstoff-, Konzept- und Fertigungsleichtbau** angewendet (vgl. Abbildung 4). Im Entwicklungsprozess werden die verschiedenen Strategien als Schleife, zum Teil mehrmals, durchlaufen (HENNING & MOELLER 2020).



Abbildung 4: Übersicht der Leichtbaustrategien und deren Zusammenspiel  
(HENNING & MOELLER 2020)

Im **Bedingungsleichtbau** werden die Anforderungen oder Bedingungen an eine Leichtbaustruktur zusammengefasst. Die Anforderungen entspringen oft Rahmenbedingungen, die z. B. durch die Gesellschaft oder das Gesetz vorgegeben werden. Erst durch eine kritische Auseinandersetzung damit ergeben sich Leichtbaupotenziale.

Im **Konzeptleichtbau** wird eingehender auf die Teil- und Gesamtstruktur des Produktes eingegangen. Ziel ist es, durch systematische Anpassungen in der Teil- bzw. Gesamtstruktur die Gesamtmasse zu reduzieren. Im Konzeptleichtbau wird die grundlegende Struktur des Gesamtsystems festgelegt.

Im **Formleichtbau** wird die Struktur an die Anforderungen der erwarteten Belastung, der bereitstehenden Bauräume, der Integration von Lasteinleitungselementen und der verfügbaren Fertigungstechnologien angepasst. Durch Formgebung und optimale Gestaltung der Lastpfade mit dem Ziel einer gleichmäßigen Kraftverteilung wird ein Bauteil so angepasst, dass eine Struktur mit minimalem Gewicht entsteht. Nutzbare Werkzeuge sind z. B. Topologieoptimierung oder Verbesserung der Bauteilsteifigkeit durch Sicken (BENDSØE & SIGMUND 2004).

Ziel des **Stoffleichtbaus** (auch Werkstoffleichtbau genannt) ist es, die Anforderungen an eine Struktur mit einem Werkstoff niedriger Dichte zu erfüllen. Es wird versucht, einen bestehenden Werkstoff durch einen mit niedriger Dichte oder höherer Festigkeit zu ersetzen, um so Gewicht zu sparen.

Die Gewichtsreduzierung durch die Anpassung von Fertigungs- und Montageprozessen wird als **Fertigungsleichtbau** bezeichnet. Dabei werden die technologischen Möglichkeiten zur Fertigung des Bauteils ausgeschöpft. Diese Leichtbaustrategie lässt sich selten alleine betrachten, weil sie eng mit dem Form- und Stoffleichtbau verbunden ist.

Zur Bewertung des Leichtbaunutzens ist eine Betrachtung der Fertigungsprozesskette und des Produktlebenszyklus notwendig. Die Bewertung ist einerseits auf Kostenbasis zu treffen (**Leichtbauökonomie**), andererseits auf Grundlage der Ressourceneffizienz (GÖTZE ET AL. 2011, VOGT 2015).

Die **Bauweise** beschreibt die festgelegte Anordnung von Konstruktions- und Formelementen innerhalb eines Bauteils (HENNING & MOELLER 2020). Im Zuge der Leichtbaugestaltung wurden verschiedene Bauweisen entwickelt, beispielhaft sei als Vergleich von Bauweisen der Einsatz von Rippen oder Gitterstrukturen als Versteifungselemente genannt (KLEIN 2013). Im Sinne dieser Definition soll der Begriff **Bauweise** in der vorliegenden Arbeit verwendet werden. Insbesondere werden verschiedene Bauweisen verglichen, die Leichtbau durch unterschiedliche meso- und makroskopische Formelemente bzw. Strukturen ermöglichen.

## 2.2 Verzahnungstechnik

Verzahnungen werden als Maschinenelement in Getrieben eingesetzt, um eine Drehbewegung formschlüssig zu übertragen (WITTEL ET AL. 2017). Abhängig von Aufgabe und Anforderung werden verschiedene Zahnradformen verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der geometrischen Grundlagen, Verzahnungsprofile und Getriebeausführungen wird in der Literatur von NIEMANN & WINTER 2003, WITTEL ET AL. 2017, KLOCKE & BRECHER 2017 und FELTEN 2018 gegeben. In dieser Arbeit werden nur die relevanten Grundlagen der Getriebefunktion, der Grundgrößen und des Wirkungsgrads knapp dargelegt.

In der Regel wird durch Zahnräder die Bewegung gleichförmig übertragen und das Getriebe kann folgende Ziele erfüllen:

- Schlupflose Übertragung einer Leistung oder einer Drehbewegung bei konstanter Übersetzung
- Wandlung des Drehmoments oder der Drehzahl
- Drehrichtungsfestlegung zwischen An- und Abtrieb
- Bestimmung der Wellenlage (Antriebs-/Abtriebswelle) zueinander (FELTEN 2018)



Zahnräder führen dabei eine formschlüssige Kraftübertragung zwischen zwei nicht fluchtenden Wellen aus. Die Kraft wird über die Zähne in den Radkörper geleitet und durch die Welle-Nabe-Verbindung (z. B. Passfeder) auf die Welle übertragen. Bei Drehung greifen die Zähne nacheinander in die entsprechende Zahnücke des Gegenrads ein, wodurch ein Kontakt zwischen den Zahnflanken entsteht. Der Eingriffspunkt wandert beim treibenden Rad vom Zahnfuß bis zum Zahnkopf und beim getriebenen Rad in umgekehrte Richtung. Ein reines Rollen erfolgt nur im Wälzpunkt, ansonsten findet ein Gleiten der Zahnflanken statt. Je nach Überdeckung ist ein Einzeleingriff oder auch ein Doppeleingriff möglich, bei dem ein bzw. zwei Zahnpaare in Kontakt sind (KLOCKE & BRECHER 2017). Charakteristische Geometrie- und Grundgrößen von Stirnrädern sind in Abbildung 5 dargestellt. Wesentliche Grundgrößen sind Kopfkreisdurchmesser, Fußkreisdurchmesser und Teilkreisdurchmesser.

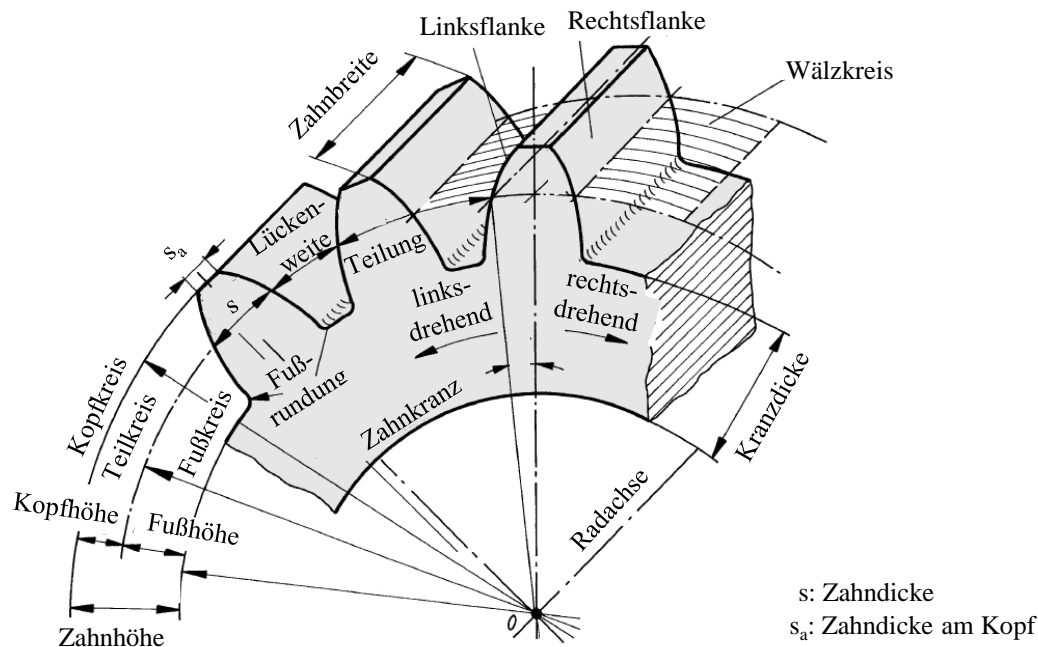


Abbildung 5: Geometriegrößen am Geradstirnrad nach WITTEL ET AL. 2017

Auf dem Teilkreisdurchmesser ( $d$ ) liegt die Teilung ( $p$ ), die als Länge des Teilkreisbogens zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rechts- und Linksflanken festgelegt ist. Der Teilkreisdurchmesser ( $d$ ) lässt sich mit Hilfe des Teilkreisumfangs eines Rades, der Teilung ( $p$ ) und der Zähnezahl ( $z$ ) berechnen:

$$d = z * \frac{p}{\pi} = z * m_n \quad (1)$$

Hierbei ergibt sich die teilungsabhängige Größe des Moduls ( $m_n$ ), auf die alle weiteren Größen einer Verzahnung bezogen werden können (FELTEN 2018). Die Zähne sind im Betrieb einer dynamischen Belastung ausgesetzt, die zu einer schwellenden Belastung an der Flanke führt. Diese Kraft führt zu einer Biegespannung im Zahnfuß und zu einer Hertz'schen Pressung an der Zahnflanke (Zahnflankenpressung) (WITTEL ET AL. 2017).

Getriebe können Drehmoment und Drehzahl nach den definierten Anforderungen von einer Antriebs- zu einer Abtriebsseite wandeln. Der Quotient aus Antriebs- ( $n_{an}$ ) und Abtriebsdrehzahl ( $n_{ab}$ ) sowie aus Antriebs- ( $\omega_{an}$ ) und Abtriebswinkelgeschwindigkeit ( $\omega_{ab}$ ) ergibt das Übersetzungsverhältnis ( $i$ ):

$$\frac{n_{an}}{n_{ab}} = \frac{\omega_{an}}{\omega_{ab}} = i \quad (2)$$

Das Verhältnis von Antriebs- ( $M_{an}$ ) und Abtriebsdrehmoment ( $M_{ab}$ ) lässt sich folglich nach FELTEN (2018) mit Hilfe des Wirkungsgrads ( $\eta$ ) und des Übersetzungsverhältnisses ( $i$ ) eines Getriebes berechnen:

$$\frac{M_{ab}}{M_{an}} = \eta * i \quad (3)$$

Die Anforderungen und Baugrößen von Zahnrädern variieren je nach Anwendungsfall und es haben sich eine Vielzahl an **Fertigungsverfahren** in der Industrie etabliert.

### 2.2.1 Fertigung und Wärmebehandlung metallischer Verzahnungen

Im folgenden Abschnitt werden ein Verfahrensüberblick und die notwendigen Prozesskettenschritte vorgestellt. Die Fertigung von Verzahnungen stellt hohe Anforderungen an die Verfahren und Werkzeuge, um die geforderten Eigenschaften wie Tragfähigkeit und Laufruhe zu gewährleisten (WITTEL ET AL. 2017). Die Prozesskette lässt sich prinzipiell in die Fertigung der **Vorverzahnung**, der **Wärmebehandlung** und der **Hartfeinbearbeitung** unterteilen (Abbildung 6).

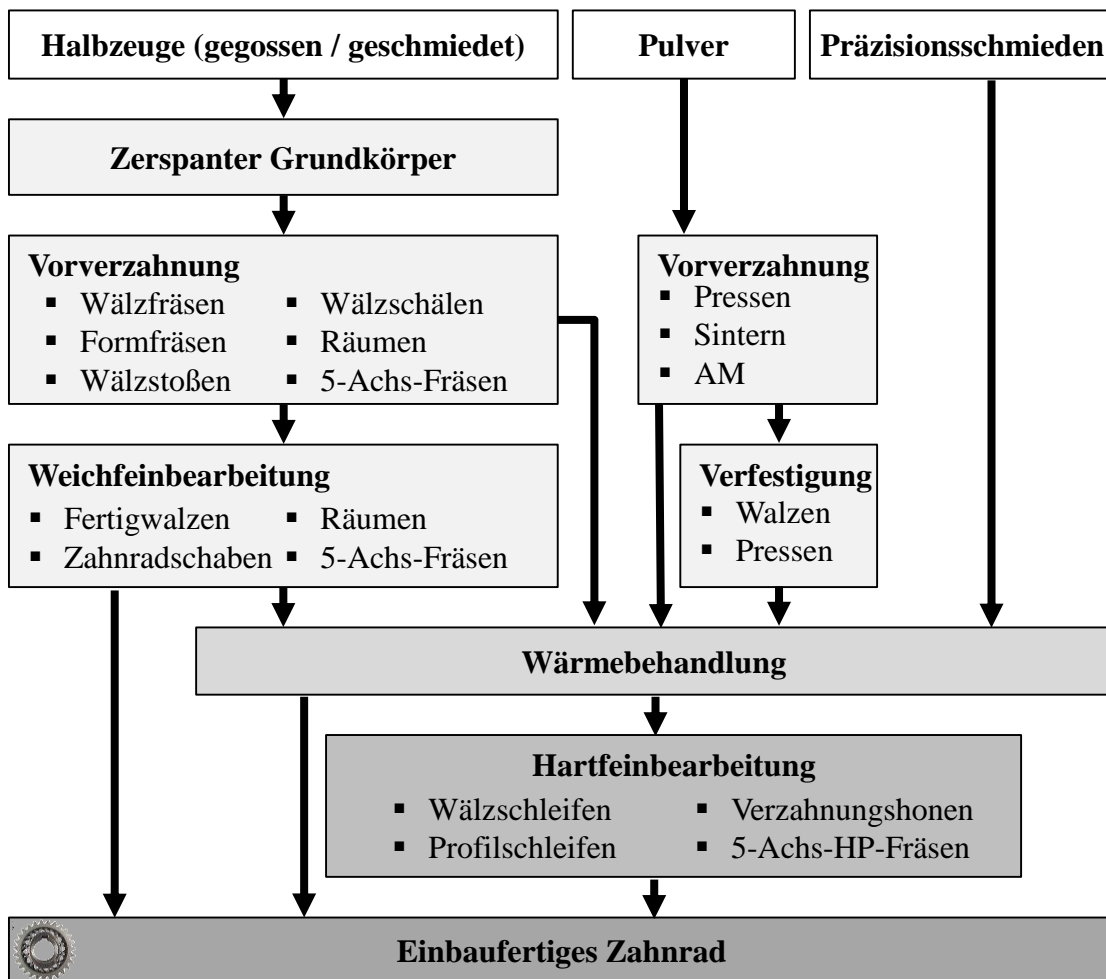


Abbildung 6: Überblick über Prozesskettenschritte und Fertigungsverfahren für Verzahnungen in Anlehnung an KLOCKE & BRECHER 2017; AM: Additive Fertigung; HP: High Performance

Als Ausgangsmaterial können Halbzeuge, gegossen und geschmiedet, oder Pulver verwendet werden. Aus diesen wird ein endkonturnaher Rohling durch z. B. Sintern oder spanende Verfahren wie Wälzfräsen gefertigt. Die Herstellung einer Vorverzahnung kann ebenso durch additive Fertigungsverfahren aus Einsatz- oder Vergütungsstahl erfolgen (KAMPS 2018, DENNIG ET AL. 2021). Die anschließende Wärmebehandlung (Einsatzhärten, Vergüten, Nitrieren oder Carbonitrieren) dient dazu, das Gefüge an die Anforderungen anzupassen. Das Einsatzhärten ist dabei das industriell meist genutzte Verfahren (BARGEL & SCHULZE 2018). Darauf folgt die Hartfeinbearbeitung, die die Feingeometrie der Zahnflanken erzeugt und auftretenden Verzug durch die Wärmebehandlung kompensiert. In der Regel wird dieser Schritt als Schleifprozess durchgeführt. Mit auftretenden hochleistungsfähigen Zerspanungsmaschinen und Werkzeugen kann dieser Schritt auch als Fräsprozess (z. B. High Performance Cutting (HPC) oder High Speed Cutting (HSC)) durchgeführt werden. Durch die eingestellte Härte des Materials und die geringen

Abtragsraten ist dieser Prozessschritt kostenintensiv und kann bis zu 25 % der Fertigungskosten betragen (TRUTE 2008). Für eine detaillierte Darstellung der Fertigungstechnologien für Zahnräder sei auf die weiterführende Literatur FELTEN 2018 und KLOCKE & BRECHER 2017 verwiesen.

Es gilt, die gegenseitige Beeinflussung der **unterschiedlichen** Fertigungstechnologien innerhalb einer Prozesskette sowie die vom Prozess abhängigen erreichbaren Eigenschaften bereits während der Auslegung zu berücksichtigen (STEINBACHER ET AL. 2012). Dies betrifft insbesondere den Bauteilverzug entlang der Prozesskette und die entstehenden Eigenspannungen, die sich positiv auf die erzielbare Tragfähigkeit auswirken können (STENICO 2007). Außerdem ist die Energie- und Ressourceneffizienz bei der Gestaltung der Prozesskette zu beachten (REINHART ET AL. 2011). Ebenso spielen Kriterien wie Stückzahl, Baugröße und angestrebte Qualität bei der Auswahl der Fertigungsprozesse eine Rolle (KLOCKE & BRECHER 2017).

Das **Einsatzhärten** stellt eine Kombination aus einer thermochemischen Behandlung (Aufkohlen) und einem thermischen Verfahren (Härten) dar (SEIDEL & HAHN 2018). Ziel des Einsatzhärtens ist es, der Randschicht von Werkstücken aus Stahl eine höhere Härte und der Komponente insgesamt bessere mechanische Eigenschaften zu verleihen (DIN 17022-3). Das Einsatzhärten besteht aus drei Schritten, dem Aufkohlen mit nachfolgendem Härten und abschließendem Anlassen. Härten und Anlassen sind auch Prozessschritte des Vergütens, welches allerdings nur bei Stählen mit einem durchgehenden Kohlenstoffgehalt von rund 0,3 Masseprozent zur Steigerung der Zähigkeit im gesamten Bauteil durchgeführt wird (ROOS & MAILE 2015).

Eine Stahlhärtung ist im Normalfall ab einem Kohlenstoffgehalt von rund 0,3 Masseprozent (Ma.-%) möglich. Bei Einsatzstählen muss auf Grund des Kohlenstoffgehalts von 0,15 bis 0,25 Ma.-% ein ausreichender Kohlenstoffgehalt durch das **Aufkohlen** der Randzone zur Verfügung gestellt werden (BARGEL & SCHULZE 2018). Das Aufkohlen ist ein Glühprozess, der bei hohen Temperaturen (meist zwischen 870–930 °C) in kohlenstoffhaltiger Atmosphäre ausgeführt wird. Kohlenstoffmonoxid (CO) besitzt die höchste Kohlenstoffverfügbarkeit und wird daher industriell als Aufkohlungsgas eingesetzt. Als Prozessgröße gilt der eingestellte Kohlenstoffpegel ( $C_p$ ), welcher als Maß für die Wirkung des Aufkohlungsmittel gilt. Eine Anreicherung des Kohlenstoffs in der Randzone erfolgt durch Adsorptions- und Absorptionsvorgänge. Dieser Vorgang wird materialabhängig durch die Kohlenstoffübergangszahl ( $\beta$ ) bestimmt. Durch Diffusionsvorgänge, ge-

steuert durch den Diffusionskoeffizienten ( $D_C$ ), und die hohe Kohlenstofflöslichkeit der  $\gamma$ -Phase (Austenit) für Kohlenstoff entsteht eine zeitgesteuerte Anreicherung der Werkstückoberfläche in Richtung des Werkstückkerns (vgl. Abbildung 7) (BARGEL & SCHULZE 2018).

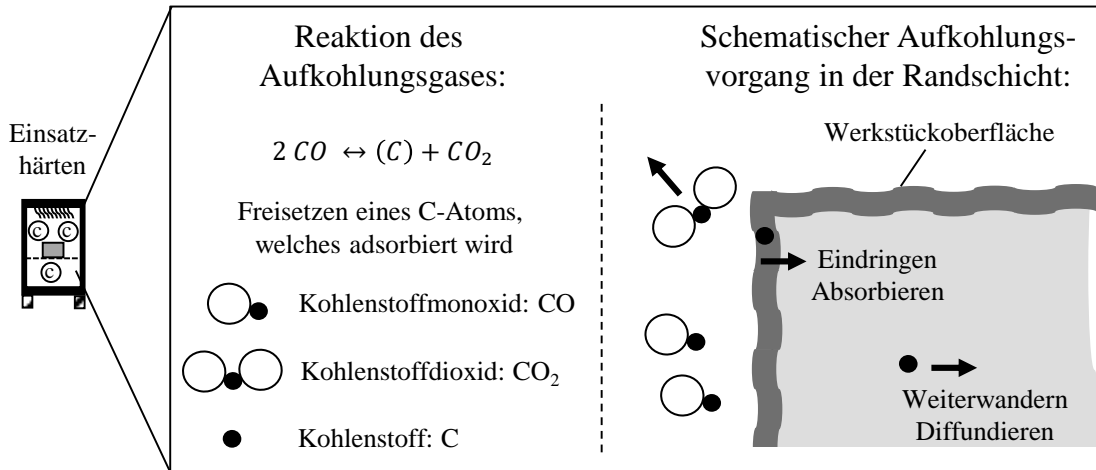


Abbildung 7: Anreicherung der Randzone mit Kohlenstoff (LIEDTKE 2008)

Die Aufkohlungstiefe ist eine entscheidende Kenngröße für die Anreicherung des Kohlenstoffs in der Randzone. Eine eutektoide Konzentration von über 0,8 Ma.-% Kohlenstoff soll vermieden werden, um die Bildung von Korngrenzzenementit und Restaustenit beim Härten zu verhindern. Deshalb wird ein Kohlenstoffgehalt von 0,6 bis 0,8 Ma.-% angestrebt (SEIDEL & HAHN 2018).

Die gewünschten Eigenschaften erhalten die aufgekohlten Werkstücke erst durch den eigentlichen **Härteprozess**, der durch das rasche Abkühlen von der Härtetemperatur stattfindet. Ziel ist es, in der Randschicht Martensit und Bainit durch diffusionslose Umwandlung aus der mit Kohlenstoff gesättigten  $\gamma$ -Phase (Austenit) zu erzeugen und damit eine Härtesteigerung zu erzielen (KLOCKE & BRECHER 2017). Das Umwandlungsverhalten differiert entsprechend dem unterschiedlichen Kohlenstoffgehalt zwischen aufgekohlter Randschicht und Kern. Start- und Endtemperatur der Martensitbildung und  $A_{c3}$ -Temperatur (Ende der Austenitbildung) in Rand und Kern sind verschieden. Durch den Kohlenstoffgehalt im Rand beginnt und endet die Austenitumwandlung früher als im Kern (LIEDTKE 2008). Der Härteprozess kann in unterschiedlicher Weise direkt oder nach einem Zwischenhalten für Bearbeitungsschritte (z. B. Zerspanen oder Richten) durchgeführt werden, wie in Abbildung 8 dargestellt. Das Direkthärten ist das wirtschaftlichste der gezeigten Verfahren. Für eine detaillierte Beschreibung der Härteverfahren sei auf die weiterführende Literatur wie BARGEL & SCHULZE 2018 verwiesen.

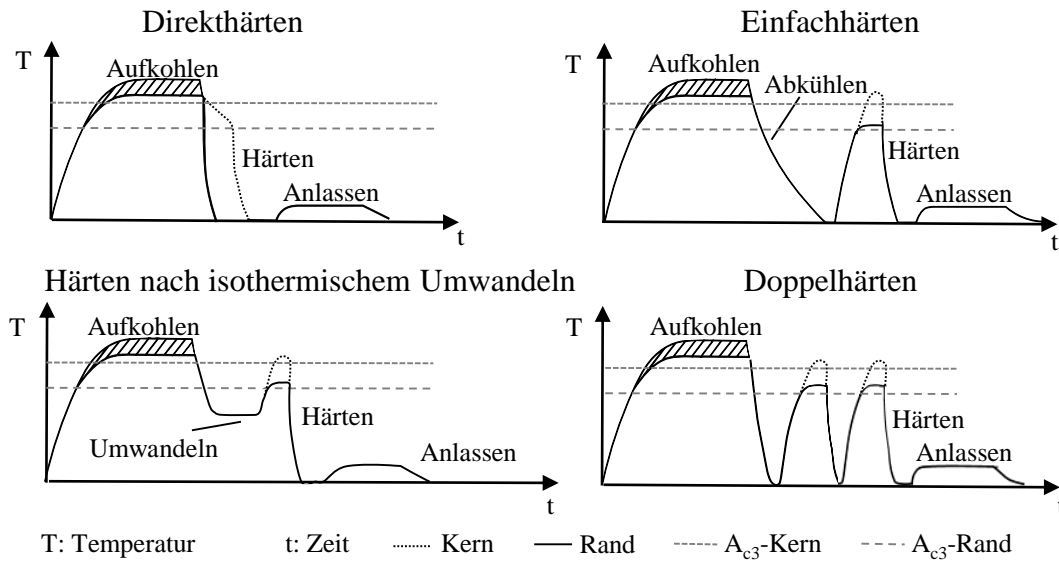


Abbildung 8: Varianten des Einsatzhärtens nach DIN 17022-3

Industrieller Standard ist das Einsatzhärten durch Aufkohlen im Gas mit anschließendem Abschrecken in Öl (Direkthärten). Durch die lange Prozesszeit des Aufkohlens, bedingt durch den langsamen Kohlenstoffübergang aus dem Gas, meist Kohlenstoffmonoxid, entstehen dabei bis zu 25 % der Kosten in der konventionellen Zahnradherstellung (TRUTE 2008).

Bei allen beschriebenen Varianten des Härtens ist es üblich, einsatzgehärtete Werkstücke **anzulassen**. Gewöhnliche Anlasstemperaturen bewegen sich im Bereich von 150–250 °C. Je nach gewählter Temperatur kann Restaustenit umgewandelt oder es können Carbide und Ferrit gebildet werden. Durch das Anlassen steigt die Zähigkeit des Werkstücks, während die Randhärte leicht abnimmt (BARGEL & SCHULZE 2018).

Die **Einsatzhärtungstiefe CHD** (*Case Hardness Depth*) stellt einen wichtigen Kennwert der erfolgten Einsatzhärtung dar und ist direkt mit dem eingestellten Kohlenstoffverlauf verknüpft. Die CHD ist definiert als senkrechter Abstand von der einsatzgehärteten Werkstückoberfläche bis zu dem Abstand, an dem die Härte auf den Grenzwert von 550 HV1 fällt (DIN 17022-3).

## 2.2.2 Auslegungskenngrößen

Die Beanspruchungsgrenze von Verzahnungen ist durch die Tragfähigkeit festgelegt. Im Wesentlichen können dabei drei Schadensfälle identifiziert werden, die die Beanspruchungsgrenze definieren:

- Zahnflankenermüdung bestimmt durch die Grübchentragfähigkeit
- Zahnbruch bestimmt durch die Zahnfußtragfähigkeit
- Fressen bestimmt durch die Fresstragfähigkeit (WITTEL ET AL. 2017)

Eine Übersicht über die Auslegungskennwerte von Zahnrädern und die Berechnungsgrößen sind in Abbildung 9 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

Grübchentragfähigkeit	Flankenpressung (Ermittlung über Hertz'sche Pressung)
Zahnfußtragfähigkeit	Tangentialspannung in Zahnhöhenrichtung am Zahnfuß
Fresstragfähigkeit	Gewichteter Mittelwert der Oberflächentemperatur und veränderliche Kontakttemperatur über die Eingriffsstrecke
Betriebsfestigkeit	Zahnbeanspruchung bei zeitlich veränderlicher Belastung

Abbildung 9: Tragfähigkeitsnachweise zur Auslegung von Zahnrädern

Wird die ertragbare Pressung miteinander in Eingriff kommender Zähne überschritten, kommt es zu einem Herauslösen von Teilen der Zahnflanke. Bei genügend hoher Anzahl an Überrollvorgängen entstehen grübchenartige Vertiefungen, die bei unveränderten Betriebsbedingungen mit steigender Laufzeit zunehmen. Die Grübchenbildung ist eine Ermüdungserscheinung des Werkstoffs. Bei Stirnrädern wird die Hertz'sche Pressung genutzt, um die Flankenpressung ( $\sigma_H$ ) zu berechnen, die als Grundlage zur Beurteilung der Grübchentragfähigkeit gilt. Weitere Einflüsse wie Reibungszahl, Richtung und Größe des Schlupfes und Schmiermittel können durch rechnerische Normfaktoren in der zulässige Flankenpressung berücksichtigt werden (DIN 3990-2).

Wird die Beanspruchungsgrenze im Zahnfuß überschritten, kann es zum Bruch eines Zahnes kommen, was im Allgemeinen das Ende der Lebensdauer des Getriebes darstellt. Je nach Bruchfläche kann auf die Schadensursache Dauer- oder Gewaltbruch geschlossen werden (WITTEL ET AL. 2017). Die Zahnfußtragfähigkeit wird über die maximale Zugspannung (Tangentialspannung in Zahnhöhenrichtung) am Zahnfuß berechnet. Sie wird als Zahnfußspannung ( $\sigma_F$ ) bezeichnet. Erste Anrisse entstehen häufig am Fuß der Zahnflanke, die auf Druck beansprucht wird. Bei Schwellbeanspruchung und normaler Zahnform führt dies im Allgemeinen nicht zum Dauerbruch. Die zugbeanspruchte Seite der Fußrundung ist meist der Startpunkt des Bruchs (DIN 3990-3). Bei sehr dünnen Zahnkränzen kann auch der Zahnkranz selbst brechen. Dies schränkt die mögliche Leichtbaugestaltung von Zahnrädern ein und ist bei der Auslegung zu beachten (NIEMANN & WINTER 2003).

Im Zahnkontakt kann es durch die gemeinsame Wirkung von Pressung und hoher Gleitgeschwindigkeit und der folgenden Temperaturerhöhung zu einem Abreißen des Schmierfilms zwischen den Zahnflanken kommen, wodurch ein kurzzeitiges örtliches Verschweißen der Flanken verursacht wird (Fressen). Dieses Phänomen tritt auch bei örtlich hohen Pressungen und niedrigen Gleitgeschwindigkeiten auf. Auf der Zahnflanke zeigen sich daraufhin streifenförmige Bänder in Zahnhöhenrichtung, die am Zahnkopf und Zahnfuß am stärksten ausgeprägt sind (KLOCKE & BRECHER 2017). Die notwendige Sicherheit gegen diese Schadensart wird durch die Berechnung der Fresstragfähigkeit bestimmt. Für eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsgrundlage sei auf die Fachliteratur verwiesen (NIEMANN & WINTER 2003, KLEIN 2012).

Zeitlich variable Belastungen im Betrieb von Getrieben wie Anfahrvorgänge und Arbeiten bei oder nahe kritischen Drehzahlen führen zu unterschiedlichen Zahnbeanspruchungen. Diese werden im Rahmen von Lastkollektiven in der Bestimmung der Betriebsfestigkeit berücksichtigt (DIN 3990-6).

Einen entscheidenden Einfluss hat, neben der Verzahnungsgeometrie und der eingesetzten Materialqualität, die eingestellte Einsatzhärte. Empfohlene Werte der Einsatzhärte ( $CHD_{opt}$ ) nach der Zahnradendbearbeitung zur Erreichung einer optimalen Tragfähigkeit bezogen auf die zulässige Spannung an der Zahnfußrundung wurden empirisch in Abhängigkeit des Moduls ( $m_n$ ) bestimmt und liegen in folgenden Bereichen:

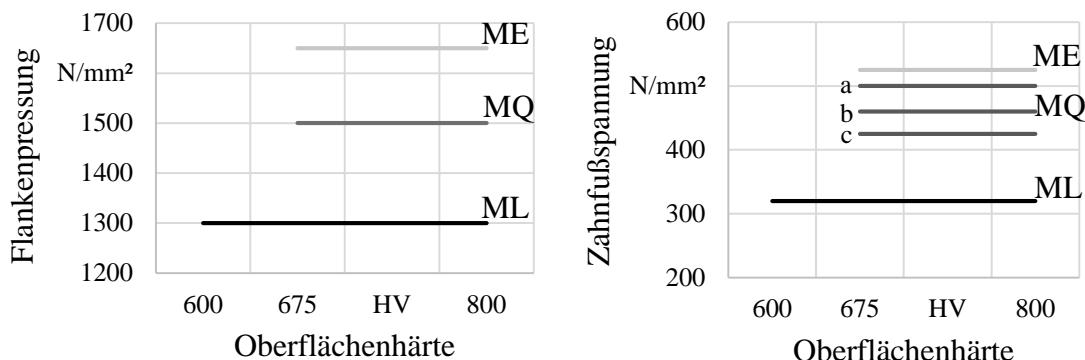
$$0,1 * m_n < CHD_{opt} < 0,2 * m_n \quad (4)$$

Für eine optimierte Grübchentragfähigkeit sollte dabei ein Wert im oberen Bereich der CHD-Empfehlung oder sogar darüber gewählt werden. Die Auslegung stellt also einen Kompromiss und ein Abwägen der Tragfähigkeiten untereinander dar. Gleichzeitig gibt es weitere Einflussfaktoren wie Gefügestand, Kernfestigkeit, Restaustenitgehalt, Oberflächenhärte, Randoxidation im Zahnfußbereich oder Eigenspannungen, die die Tragfähigkeit in Verbindung mit der gewählten Einsatzhärte signifikant beeinflussen können (TOBIE 2001).

Die Materialqualität von Stählen für Zahnräder lässt sich in drei Klassen (ML, MQ, ME) einteilen. Dabei steht die ML-Klasse für moderate Anforderungen an die Qualität des Werkstoffs und den Wärmebehandlungsprozess. Die MQ-Klasse steht für Anforderungen, die durch erfahrene Hersteller bei moderaten Fertigungskosten erfüllt werden können. Die ME-Klasse stellt die höchsten Anforderungen, die realisiert werden müssen, wenn ein hohes Maß an Betriebszuverlässigkeit erforderlich ist (ISO 6336-5). Unter Einhaltung der Materialklassenanforderungen wurden



Tragfähigkeitskennwerte für Referenzverzahnungen ermittelt, welche die zu erwarteten Eigenschaften z. B. ertragbare Flankenpressung oder Zahnfußspannung je Materialklasse aufzeigen (siehe Abbildung 10).



- a: Kernhärte  $\geq 305$  HV      b: Kernhärte  $\geq 265$  HV und Jominy-Abschreckhärte  $\geq 285$  HV  
 c: Kernhärte  $\geq 265$  HV und Jominy-Abschreckhärte  $< 285$  HV

Abbildung 10: Erzielbare Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Materialqualität

Es wird deutlich, dass mit steigender Materialqualität die zulässige Flankenpressung und die Zahnfußspannung steigen. Die ME-Klasse erzielt dabei die höchsten Tragfähigkeiten. Ebenso wird deutlich, dass Materialien mit erhöhter Kernhärte stärkeren Beanspruchungen im Zahnfuß standhalten können. Bisher enthält die Normung und Literatur keine Einordnung von additiv gefertigtem Material in diese Klassifikation und Tragfähigkeiten wurden nur in begrenztem Maße ermittelt, so dass eine Einteilung noch nicht möglich ist.

Neben den erzielbaren Tragfähigkeiten werden an die Herstellung des Werkstoffs noch weitere Anforderungen gestellt, die bisher noch nicht für Materialien aus der additiven Fertigung ermittelt wurden. Tabelle 1 zeigt einen Auszug dieser Anforderungen, die sich aus denen an die Stahlherstellung und denen an die Wärmebehandlung (Qualitätssicherung) sowie den resultierenden Eigenschaften zusammensetzen. Hieraus lassen sich Anforderungen für den additiven Fertigungsprozess und die Auslegung der Prozesskette ableiten. Unterschiede im Einsatzhärteergebnis von AM-Material und konventionellem Material wurden bereits von KAMPS und SCHMITT ET AL. beschrieben (KAMPS 2018, SCHMITT ET AL. 2020b).

*Tabelle 1: Auszug aus den Anforderungen für gegossene und geschmiedete Einsatzstähle in der Zahnradfertigung (ISO 6336-5)*

Anforderung	ML-Klasse	MQ-Klasse	ME-Klasse
Reinheit	Keine Anforderung	Reinheit nach ISO 4967 und mittlere Ansprüche	Reinheit nach ISO 4967 und hohe Ansprüche
Sauerstoffgehalt	Keine Anforderung	< 25 ppm	< 25 ppm
Umformgrad	Keine Anforderung	3:1 für Barrenguss und 5:1 für Strangguss	
Oberflächenhärte	> 600 HV	660-800 HV	
Kernhärte	> 245 HV	> 265 HV	> 300 HV
Gefüge an der Oberfläche	Keine Anforderung	Martensit (Acicular)	Martensit (Acicular)

ppm: parts per million

### 2.2.3 Leichtbau in Zahnradern

Mit zunehmender Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials in einfachen Fahrzeugstrukturen geraten hochbeanspruchte Bauteile wie Kurbel- und Nockenwellen oder Zahnräder in den Fokus (POLITIS ET AL. 2021). Durch den Leichtbau können in diesen Elementen neben Emissionen auch Massenträgheitsmomente, Geräuschentwicklung und Verschleiß reduziert werden. Insbesondere für hochdrehende Elektromotoren stellt dies einen Vorteil dar (HOU ET AL. 2020). Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Forschung zum Leichtbau in Zahnradern, geordnet nach Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau, dargestellt.

Im **Stoffleichtbau** gibt es Ansätze, die eingesetzten Stahlwerkstoffe durch Werkstoffe mit geringerer Dichte zu ersetzen. So wurden bereits erste Verzahnungen in PEEK für die Automobilindustrie umgesetzt (QUITTER 2019). Allerdings sind diese in der Anwendung auf Nebenaggregate mit niedrigen Belastungen be-

schränkt, da die mechanische und thermische Belastbarkeit im Zahnkontakt reduziert ist. Um diesen Nachteil zu umgehen, werden (faserverstärkte) Kunststoffe nur für den Zahnradkörper eingesetzt (Schutzrecht US000005852951A). Mit diesem Ansatz kann für kleine Baugrößen unter Erzielung gleicher Tragfähigkeiten eine Masseinsparung von 20 % realisiert werden (HANDSCHUH ET AL. 2013). SIM ET AL. zeigten, dass dieses Vorgehen bei der Verwendung eines Aramid- und Phenol-Composites, neben Leichtbau, zu 43,2 % Reduktion der Vibrationen führt (SIM ET AL. 2020). Die Reduktion der Vibration ist vornehmlich auf die Werkstoffdämpfung des Composite-Werkstoffs zurück zu führen und nicht mit dem erzielten Leichtbau. Außerdem werden vermehrt höherfeste Stahlwerkstoffe für Zahnräder eingesetzt (UCHARZEWSKI 2010). So kann durch die Verwendung von Vanadium als Legierungselement die Feinkornbeständigkeit erhöht und dadurch die Dauerfestigkeit gesteigert werden (WURM 2020). Dies kann zur Reduzierung der Verzahnungsbreite genutzt werden, ist aber durch erhöhte Rohstoffpreise mit gestiegenen Fertigungskosten verbunden.

Beim **Formleichtbau** wird in der Regel der niedrig belastete Zahnradkörper mit Materialausparungen versehen. Dies kann beispielsweise durch Fräsen, Bohren oder Umformen erfolgen (LÜBBEN ET AL. 2016). Massereduktionen von 5–15 % können erreicht werden. Ebenso wurde gezeigt, dass durch diese Leichtbaumaßnahmen der Verzug beim Einsatzhärten in Abhängigkeit von Bauteilsymmetrie und Leichtbaugrad steigt (LUBBEN ET AL. 2017). Je nach Ausführung können die Ausparungen auch mit Deckelteilen verschlossen werden, um den Wirkungsgrad bei Ölbadenschmierungen nicht zu reduzieren (Schutzrecht DE102013005338A1). Zur Auslegung können rechnergestützte Verfahren zur Anwendung kommen (XU & DAI 2021). Dadurch entstehen meist komplexe Strukturen, die sich nur mit erheblichem Aufwand und mit Restriktionen fertigen lassen. Durch diese Restriktionen in der Herstellung kann das Leichtbaupotenzial nicht vollständig ausgenutzt werden. Die Grenzen der Fertigungstechnik limitieren diesen Ansatz.

Im **Fertigungsleichtbau** werden meistens Strukturen mit geringer Masse (formoptimiert) oder geringer Dichte (stoffoptimiert) mit einem tragfähigen Zahnkranz in Differenzialbauweise durch Fügeoperationen verbunden. Es kann dabei ein Stahlzahnkranz durch einen Schmiedeprozess auf einen Aluminiumgrundkörper geformt werden (POLITIS 2017). Eine weitere Möglichkeit des Fügens ist, neben Schmieden, Gießen oder Schweißen sowie die Nutzung von Pressverbänden für artfremde Werkstoffkombinationen (POLITIS ET AL. 2021). Dieser Ansatz wird im Press-Sintern eines additiv gefertigten Grundkörpers und eines pulvermetallurgischen Zahnkranzes verfolgt (FAROUN 2021). Ebenso wird ein bereits additiv gefertigter Titangrundkörper mit einem erodierten Stahlzahnkranz über eine

Presspassung verbunden (BMT ADDITIVE 2019). Tragfähigkeitsuntersuchungen zu diesen Konzepten stehen allerdings noch aus. In der Initiative „Massiver Leichtbau“ wurden verschiedene Zahnradgrundkörper (form- und stoffoptimiert) mit Zahnkränzen gefügt. Diese Kombinationen erreichten eine Massereduktion von bis zu 48 % (vgl. Abbildung 11).

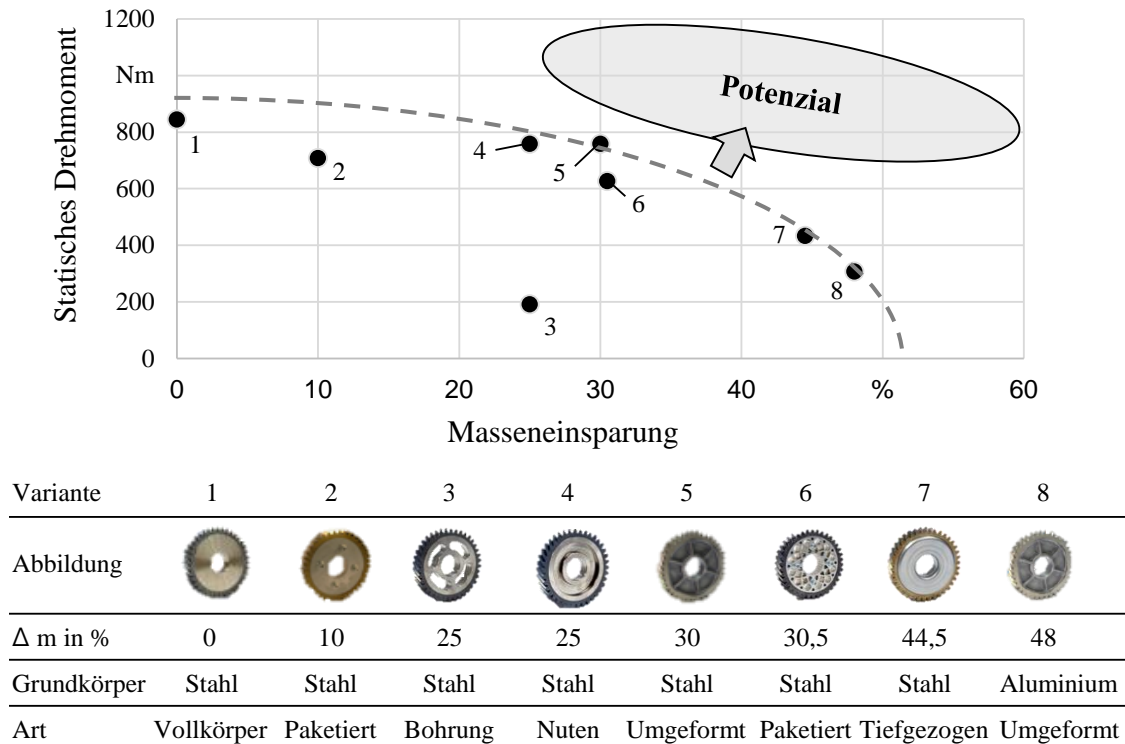


Abbildung 11: Grenze der statischen Tragfähigkeit von gefügten Leichtbauverzahnungen (nach LEONHARDT ET AL. 2020)

In der Bauteilprüfung war die Fügestelle der Schwachpunkt. Bei einem Test mit erhöhter statischer Drehmomentbelastung versagten die Verzahnungen mit einer relativen Verdrehung von Zahnkranz zu Radkörper. Konzepte mit hohem Leichtbaugrad konnten dabei geringere Drehmomente übertragen (LEONHARDT ET AL. 2020). Es zeigt sich eine Notwendigkeit, Verzahnungen zu entwickeln, die ein höheres Maß an Leichtbau mit höherer Tragfähigkeit vereinen.

Dazu scheint eine Eliminierung der Fügestelle unabdingbar zu sein. Erste Ansätze zur vollständigen Fertigung der Verzahnung aus Einsatzstahl mittels additiver Fertigung zeigt KAMPS (KAMPS 2018). Die entwickelte Konstruktionsmethodik zur Funktionsintegration von Stirnrädern gefertigt durch Laser-Strahlschmelzen erlaubt eine Massereduktion von 31 % bei gleichzeitiger Integration eines Kühlkanals (KAMPS 2018). Eine ähnliche Massereduktion wird durch den Einsatz bionischer Prinzipien in einem Zahnrad aus einer Titanlegierung umgesetzt

(MASUCH 2020). Bisher erfolgte nur die Bestimmung der Zahnfußtragfähigkeit solcher Verzahnungen. Eine Bestimmung der Zahnflankentragfähigkeit und der ganzheitlichen Festigkeit eines Zahnrads mit solcher Massereduktion wurde bisher nicht durchgeführt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es Leichtbauansätze im Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau für Zahnräder gibt. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Einsatzfelder begrenzt sind (PEEK-Zahnräder), die Fertigungsrestriktionen die optimale Form einschränken und die Tragfähigkeit (Fügestellen) gering ist. Der bestehende Ansatz des Fertigungsleichtbaus unter Nutzung der Formfreiheit der additiven Fertigung zeigt ein hohes Potenzial.

### 2.3 Prozesskettengestaltung und Wechselwirkungen

Die Bauteilqualität und die damit einhergehende Belastbarkeit eines Bauteils werden durch die durchlaufende **Prozesskette** in der Bauteilherstellung festgelegt (FELTEN 2018). Jeder durchgeführte Fertigungsprozess in der Prozesskette liefert einen Beitrag zur Festigkeit und somit auch zum Werkstoff- und Eigenspannungszustand sowie zur Geometrie des fertiggestellten Bauteils. Eine Optimierung einzelner Fertigungsprozesse ist oft nicht zielführend, da **Wechselwirkungen** zwischen den Fertigungsprozessen einer Prozesskette auftreten (ZOCH 2009). Eine ganzheitliche Optimierung und Bewertung der Prozesskette ist daher notwendig. Dies wird bereits in Teilen als theoretische Betrachtung oder für explizite Einzelbauteile umgesetzt, wie die Literatur zeigt:

- Entwicklung von Prozessketten unter dem Gesichtspunkt der Minimierung des globalen Bauteilverzugs (Distortion Engineering) für Bauteile, deren Werkstoffzustand durch Wärmebehandlungen, insbesondere thermochemische Prozesse, eingestellt wird. (THOBEN ET AL. 2012)
- Auslegung der Prozesskette von Tiefziehteilen für die Automobilindustrie zur Bestimmung der Wechselwirkungen durch eine breite simulationsbasierte Variation der Prozessgrößen (CLEES ET AL. 2010)
- Bewertung von Prozessketten und Auswahl von Prozesskettenschritten hinsichtlich Energieaufwand und resultierenden Stückkosten (REINHART ET AL. 2011, GÖTZE ET AL. 2013.)

Im Bereich der additiven Fertigung spielt die Prozesskettenbetrachtung noch eine untergeordnete Rolle. Bisher wird der Fokus auf die Optimierung von Prozessgrößen des AM-Prozesses gelegt (LIU ET AL. 2020, MERTENS ET AL. 2016, YADROITSEV ET AL. 2007). Eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette wird dagegen

nur von wenigen Autoren verfolgt (THOMPSON ET AL. 2016b, KAMPS 2018). Dies ist aber insbesondere dann notwendig, wenn eine Wärmebehandlung nach dem AM-Prozess erfolgt, um den Werkstoffzustand einzustellen. So zeigten Untersuchungen für den rostfreien Stahl 17-4 PH (1.4548) im Laser-Strahlschmelzen eine Wechselwirkung zwischen Verdüsungsgas bei der Pulverherstellung sowie Schutzgas bei der Verarbeitung und der durchgeführten Wärmebehandlung (RAFI ET AL. 2014). Bauteile des Stahls 17-4 PH weisen unter Stickstoff als Schutzgas im gebauten Zustand eine höhere Härte auf als Bauteile, die in einer Argon-Atmosphäre aufgebaut wurden. Nach der Wärmebehandlung trat der gegenteilige Effekt auf, da vermehrt Restaustenit in den unter Stickstoff gefertigten Bauteilen gefunden wurde (MEREDITH ET AL. 2018). FUNCH ET AL. ermitteln einen reduzierten Härtetiefenverlauf und eine geringere Oberflächenhärte beim Nitrieren des Werkzeugstahls 1.2709, wenn eine Zwischenwärmebehandlung wie ein Spannungsarmglühen nach dem Laser-Strahlschmelzen durchgeführt wird (FUNCH ET AL. 2022). Begründet wird dies durch die reduzierte Verfügbarkeit von Nitridbildnern (Titan und Molybdän), die durch die Zwischenwärmebehandlung intermetallisch gebunden werden.

Eine ganzheitliche Betrachtung und Optimierung der Prozesskette erscheint auch im Bereich der additiven Fertigung notwendig. Insbesondere das Einsatzhärten in der Prozesskette ist ein Verfahren mit vielen Wechselwirkungen und Einflussgrößen, z. B. Aufkohldauer, Härtetemperatur, chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, Geometrie des Bauteils oder Eigenspannungszustand. (HIPPENSTIEL ET AL. 2002, HOFFMANN ET AL. 2018, GEGNER ET AL. 2012).

## 2.4 Laser-Strahlschmelzen

Das Laser-Strahlschmelzen (Englisch: *Laser Beam Melting*, LBM) ist ein additives Fertigungsverfahren für metallische Werkstoffe mittels eines pulverförmigen Ausgangsstoffes und eines Laserstrahls. Das Fertigungsverfahren lässt sich nach DIN 8580 der ersten Hauptgruppe ‚Urformen‘ zuordnen und in die Gruppe 1.10 ‚Urformen durch Additive Fertigung‘ einordnen (DIN 8580-1). Nach der VDI 3405 wird der Prozess des Strahlschmelzens mittels eines Lasers als Energiequelle als ‚Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Aufschmelzen pulverförmigen Materials mittels Laser und Verschmelzen (Verschweißen) beim Erstarren‘ definiert (VDI 3405 BLATT 2). Ein artverwandter Prozess ist das Strahlschmelzen mit Elektronen als Energiequelle (Elektronen-Strahlschmelzen). In dieser Arbeit wird der im deutschsprachigen Raum verbreitete Begriff und die Schreibweise ‚Laser-Strahlschmelzen‘ nach VDI 3405 verwendet. Die Fertigung des Bauteils erfolgt

im Gegensatz zu spanenden Fertigungsverfahren nicht abtragend, sondern materialzuführend (additiv). Die synonyme Bezeichnung des Verfahrens nach ISO 52900 lautet „pulverbettbasiertes Schmelzen mittels Laserstrahl von Metallen“ (PBF-LB/M) (DIN EN ISO/ASTM 52900-06). Das Laser-Strahlschmelzen eignet sich besonders gut zur Fertigung kleiner Losgrößen und komplexer Bauteile (THOMPSON ET AL. 2016a). Es lassen sich eine breite Auswahl an metallischen Werkstoffen wie Titan-, Aluminium-, Nickelbasislegierungen, Stähle und Kupferwerkstoffe verarbeiten (WOHLERS 2021). Durch materialspezifisch optimierte Fertigungsparametersätze können relative Werkstoffdichten von mehr als 99,5 % erzielt werden (VDI 3405 BLATT 2).

### 2.4.1 Verfahrensablauf

Der Verfahrensablauf lässt sich grundlegend in den Pre-, In- und Post-Prozess einteilen und beschreibt alle Schritte von Bauteilgestaltung bis Erreichung der technologischen Bauteileigenschaften (VDI 3405). Die wichtigsten Systeme einer Laser-Strahlschmelzanlage und der iterative Vorgang des Prozesses sind in Abbildung 12 dargestellt.

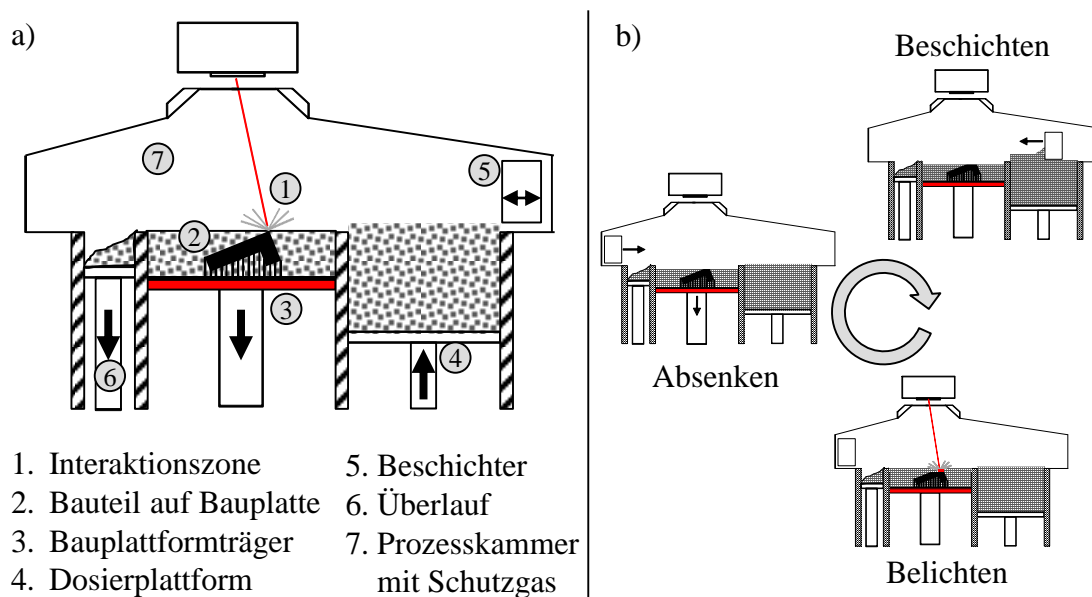


Abbildung 12: a) Detail der Prozesskammer einer Laser-Strahlschmelzanlage  
b) Iterativ wiederholender Prozessablauf

Im **Pre-Prozess** werden alle notwendigen Schritte bis zum Start der Fertigung mittels Laser-Strahlschmelzen zusammengefasst. Ausgangsbasis für den Prozess ist ein 3D-CAD-Modell des zu fertigenden Bauteils. Nachfolgend wird eine digi-

tale Baudatendatei erzeugt. Diese enthält Zusatz- und Hilfsgeometrien (z. B. Supportstrukturen), die Orientierung und Anordnung des Bauteils und die Belichtungsparameterkombination. Supportstrukturen sind Stützen, oft Gitter, mit denen Bauteile auf der Bauplatte fixiert werden, sodass die Fertigung von Überhängen oberhalb eines Grenzwinkels (materialabhängig, meist  $45^\circ$ ) möglich ist (JÄRVINEN ET AL. 2014, LINDECKE ET AL. 2018). Ebenso zählen alle Schritte der Anlagenvorbereitung wie das Einlegen der Bauplattform und das Einfüllen des Metallpulvers zum Pre-Prozess. Dem Ausgangsrohstoff Pulver kommt hierbei eine hohe Bedeutung für die Erzielung der geforderten Bauteilqualität zu (LUTTER-GÜNTHER 2020).

Der **In-Prozess** betrifft alle Fertigungsoperationen, die von der Laser-Strahlschmelzanlage ausgeführt werden. Wie in Abbildung 12 dargestellt, handelt es sich um einen iterativ wiederholenden Prozess von Beschichten, Belichten und Absenken bis zur Fertigstellung des Bauteils (GEBHARDT 2016). Beim Vorgang des Beschichtens wird eine Pulverschicht durch die Bewegung des Beschichters (5) auf die Bauplatte (3) aufgezogen. Die Bauplattform kann materialabhängig vorgewärmt sein. Dies dient zur Vermeidung von Rissen und Reduktion von Eigenspannungen (MUNSCH 2013, KEMPEN ET AL. 2014). Während des Belichtungsvorgangs werden Bauteilkontur und Fläche durch den Laserstrahl abgescannt. In der Interaktionszone (1) schmilzt das Metallpulver und erstarrt. Durch das selektive Aufschmelzen entstehen hohe Abkühlraten, die in den meisten Werkstoffen ein sehr feines Gefüge mit hoher Härte erzeugen (HOOPER 2018). Die genaue Abkühlrate ist Gegenstand anhaltender Untersuchungen und liegt verschiedenen Autoren zur Folge im Bereich von  $10^5$  bis  $10^7$  K/s (OVER 2003, HOOPER 2018, YADROITSEV ET AL. 2021). BRANNER weist darauf hin, dass die Abkühlrate, neben einer Werkstoffabhängigkeit, eng mit den verwendeten Fertigungsparametern wie Laserleistung und Scangeschwindigkeit verbunden ist (BRANNER 2010). Bauteile besitzen durch den schichtweisen Aufbau im gefertigten Zustand anisotrope mechanische Eigenschaften (KOK ET AL. 2018). Durch die Wechselwirkung entstehen Prozessnebenprodukte (Schmauch und Spratzer), die durch einen gerichteten Schutzgasstrom aus der Interaktionszone getragen werden. Nach dem Bauprozess erfolgt ein Entpacken des Bauteils aus dem Pulverbett und eine erste grobe Reinigung innerhalb der Anlage.

Im **Post-Prozess** werden alle Fertigungsschritte zusammengefasst, die nach der Entnahme aus der Laser-Strahlschmelzanlage erfolgen. In der Regel handelt es sich dabei um eine Feinreinigung des Bauteils, das Abtrennen von der Bauplattform, z. B. durch Sägen oder Drahterodieren, und eine anschließende Bearbeitung zur Erzielung der technologischen Bauteileigenschaften. Materialabhängig kann



ein Spannungsarmglühen zur weiteren Reduktion der Eigenspannungen eingesetzt werden (KAMPS 2018). Zusätzlich kann ein heiß-isostatisches Pressen (HIP) angewandt werden, um verbleibende Poren aus dem Laser-Strahlschmelzen zu schließen. Dadurch kann die Belastbarkeit sowie Sicherheit des Bauteils im Einsatz gesteigert werden (BEER ET AL. 2018). Zur weiteren Bearbeitung des Bauteils können dabei prinzipiell alle Verfahren aus der DIN 8580 verwendet werden.

### 2.4.2 Modellvorstellung im Schmelzbad

Die riss- und porenfreie Verarbeitung von Werkstoffen hängt maßgeblich von den Wechselwirkungen innerhalb der Interaktionszone und dem verwendeten Belichtungsparametersatz ab. Die Modellvorstellung von der Interaktionszone und die Haupteinflussgrößen sind in Abbildung 13 dargestellt.

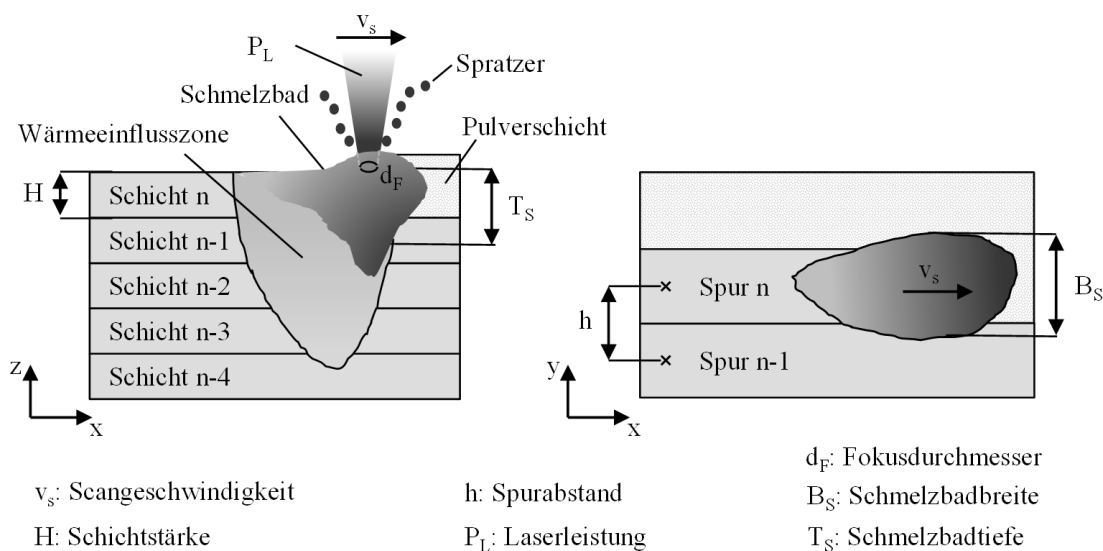


Abbildung 13: Prozessgrößen im Laser-Strahlschmelzen (nach GEB-HARDT 2016)

Durch den Laserstrahl wird eine spezifische Energie in das Pulverbett eingebracht, die zum Aufschmelzen der Partikel führt. Es bildet sich ein Schmelzbad entlang der Bewegungsrichtung des Laserstrahls. Je nach eingebrachter Energie kann, analog zur Schweißtechnik, zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen, auch Keyhole-Schweißen genannt, unterschieden werden (SCHULZE 2010). Im Laser-Strahlschmelzen konnte gezeigt werden, dass in der Regel Tiefschweißen vorliegt, wenn die Schmelzbadtiefe ( $T_S$ ) größer als die halbe Schmelzbadbreite ( $B_S$ ) ist (SCIPIONI ET AL. 2017b). Es bildet sich ein Nahtformverhältnis, das die Heißrisswahrscheinlichkeit reduziert (SCHULZE 2010). Die Tiefe des Schmelzbadts ist größer als die Schichtstärke, um ein Verschmelzen der Schichten untereinander zu

ermöglichen. Zusätzlich bildet sich eine Wärmeeinflusszone in den tiefer liegenden Schichten aus. Während des Prozesses, insbesondere im Tiefschweißmodus, kommt es zum Ausstoß von Partikeln aus der Schmelze. Diese bestehen aus komplett oder teilweise aufgeschmolzenem Material. Sie werden auch als Spratzer bezeichnet und stellen je nach Werkstoff einen Einflussfaktor für das Pulverrecycling dar (LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018b). Durch Gradienten in der Oberflächenspannung der Schmelze (z. B. innen- gegenüber außenliegenden Bereichen) kommt es zu einer Bewegung innerhalb der Schmelze, der Marangoni-Strömung (GEBHARDT 2016, SCHULZE 2010).

Als relevante Prozessgrößen wurden die Laserleistung  $P_L$ , die Scangeschwindigkeit  $v_s$ , und der Spurabstand  $h$  identifiziert (MEINERS 1999). Diese wirken zusammen mit der eingestellten Schichtstärke  $H$ , der Bauplattentemperatur und der Art des Schutzgases auf das Ergebnis des Laser-Strahlschmelzprozess (PAUZON ET AL. 2020, MERTENS ET AL. 2018). Empirische Untersuchungen von MEINERS zur Erzielung hoher Bauteildichten legen eine Korrelation zwischen Durchmesser des Lasers ( $d_F$ ) in der Fokuslage und dem Spurabstand  $h$  nahe. Die Relation wird mit einem Verhältnis von 70 % angegeben (siehe Formel 5) und kann als Ausgangspunkt für Parameterfindungen angenommen werden (MEINERS 1999).

$$h = 0,7 * d_F \quad (5)$$

Bei der Wahl einer geeigneten Schichtdicke gilt es, einen Kompromiss zwischen der benötigten Bauzeit und der erreichbaren Bauteilqualität einzugehen. Mit Hilfe der Einflussgrößen kann der eingebrachte Energiebeitrag definiert werden. Es wird dabei je nach Anwendungsfall zwischen der Streckenenergie  $E_s$  und der Volumenenergiedichte  $E_v$  unterschieden. Beide Größen sind geeignet, um den Einfluss der Fertigungsparameterkombination auf die Bauteildichte und Qualität zu beschreiben.

Die Streckenenergie  $E_s$  ist nach MEINERS 1999 als Quotient der Laserleistung  $P_L$  und der Scangeschwindigkeit  $v_s$  definiert (Formel 6). Sie bietet sich vor allem als Vergleichsgröße bei einzelnen Laserspuren an:

$$E_s = \frac{P_L}{v_s} \quad (6)$$

Die Volumenenergiedichte  $E_v$  erweitert die Streckenenergie in zwei Dimensionen und ist als Quotient der Laserleistung  $P_L$  und der Scangeschwindigkeit  $v_s$ , der Schichtstärke  $H$  und dem Spurabstand  $h$  definiert (Formel 7) (VDI 3405 BLATT 2).

$$E_v = \frac{P_L}{v_s * H * h} \quad (7)$$

Die Volumenenergiedichte ist eine empirische Größe und nur die gezielte Kombination der Einzelwerte führt zu Bauteilen mit hohen relativen Dichten (SCHMITT ET AL. 2018). Eine niedrige Energiedichte kann sich aus einer geringen Laserleistung oder einer hohen Scangeschwindigkeit ergeben. Der wirkende Energieeintrag ist dann nicht ausreichend, damit die Schmelze hinreichend lange bestehen kann und die Viskosität hoch bleibt, um das Substrat flächig zu benetzen. Die Ausbildung von Poren sowie eine mangelnde metallurgische Verbindung (Bindefehler) sind die Folge (XIANG ET AL. 2018). Ist die Energiedichte andererseits zu hoch, kann eine Verdampfung von Elementen eintreten. Gleichzeitig stören Schmelzspritzer den weiteren Prozess und begünstigen die Bildung von ungewollten Einschlüssen (GU 2015, LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018b). Ebenso kann sich der sogenannte Balling-Effekt bei einem zu hohen Energieeintrag ausbilden. Im hohen Temperaturbereich sorgen die geringe Viskosität der Schmelze und der Drang zur Oberflächenminimierung (resultierend aus intermolekularen Kohäsionskräften) für eine Einrundung der Schmelze, die mit der Bildung von Schweißperlen vergleichbar ist. Tritt der Balling-Effekt ein, so kann auch das nachfolgend aufgeschmolzene Pulver die Hohlräume nicht mehr hinreichend füllen, wodurch Poren im fertigen Bauteil verbleiben (LIVERANI ET AL. 2017). Die Volumenenergiedichte ist eine Vereinfachung der thermodynamischen Effekte im Schmelzbad. So werden unter anderem die Marangoni-Strömung und dynamische Effekte wie der Gasdruck im Tiefschweißen, der den Wärme- und Massenstrom im Schmelzbad beeinflusst, nicht erfasst. Dies stellt eine Limitierung dar, lässt aber trotzdem einen Vergleich von Parametersätzen zu. Alternative Ansätze sind Betrachtungen der aktuellen Forschung, die auf dem Konzept der normalisierten Enthalpie aufbauen (KING ET AL. 2014, SCIPIONI ET AL. 2017b).

Zur initialen Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Prozessparameterkombinationen wird die theoretische Volumen- oder Aufbaurrate  $v_{th}$  angewendet. Diese ist als das Produkt der Scangeschwindigkeit  $v_s$ , des Spurabstands  $h$  und der Schichtstärke  $H$  definiert (Formel 8) (VDI 3405 BLATT 2).

$$v_{th} = v_s * h * H \quad (8)$$

In der Parameterentwicklung kann damit die Wirtschaftlichkeit in einem frühen Stadium beeinflusst werden. Parametersätze mit hoher Scangeschwindigkeit und hohem Spurabstand (bei fester Schichtstärke) sind für eine hohe Produktivität zu bevorzugen.

Neben den beschriebenen Prozessparametern kann weiterhin zwischen verschiedenen Scanstrategien unterschieden werden. Durch letztere wird die Art des Abfahrens der Fläche durch den Laserstrahl beschrieben. Häufig benutzte Strategien sind Streifen mit variierter Breite oder ein Schachbrettmuster mit variierter Schachbrettbreite (vgl. Abbildung 14) (GEBHARDT 2016).

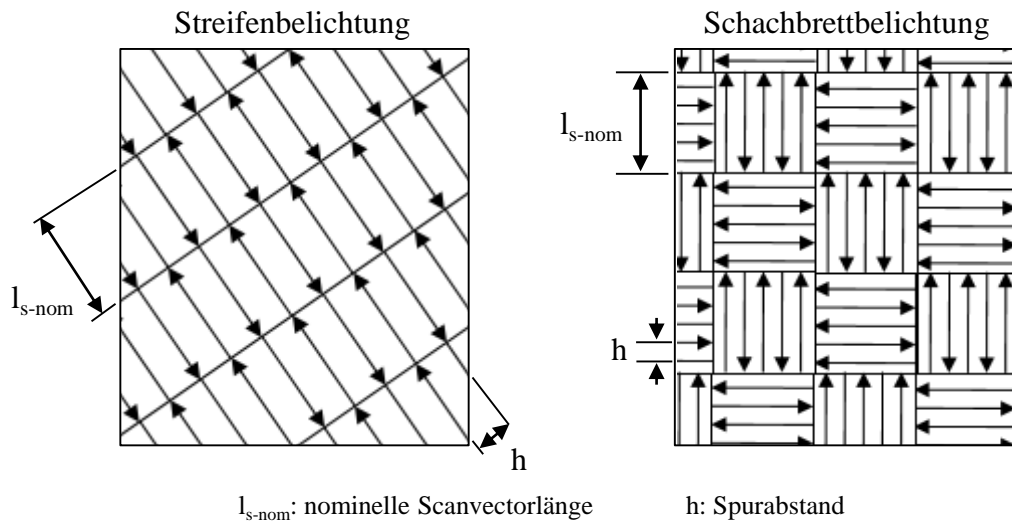


Abbildung 14: Streifen- und Schachbrettbelichtung im Laser-Strahlschmelzen (GEBHARDT 2016)

Beide Scanstrategien werden durch die nominelle Scanvectorlänge ( $l_{s-nom}$ ) der Streifenbreite und der Schachbrettgröße beschrieben. An den Bauteilgrenzen wird die nominelle Scanvectorlänge reduziert, um die geometrische Kontur des Bauteils zu erzeugen. Anschließend kann eine Konturbelichtung erfolgen. Bei der Schachbrettstrategie werden die einzelnen Schachbrettfelder stochastisch abgefahren und es ergibt sich eine gleichmäßigere Wärmeverteilung über die Fläche, wobei diese Wirkung bei kleinen Flächen geringer ausfällt als bei größeren (PLATT ET AL. 2018). Durch die gleichmäßigere Wärmeverteilung und oft geringe Schachbrettbreite von ca. 5 mm kann diese Scanstrategie zur Reduktion der Eigenspannungen genutzt werden (MUNSCH 2013). Allerdings ist die Belichtungszeit durch häufiges Springen des Lasers und eine erhöhte Anzahl an Umkehrpunkten erhöht. In der Regel wird die Orientierung der Scanstrategie in jeder Schicht verändert, um Anisotropien zu vermeiden (LEICHT ET AL. 2020). Die verwendete Scanstrategie beeinflusst durch die Art der Wärmeverteilung die entstehende Mikrostruktur und damit auch die resultierenden Materialeigenschaften (KUDZAL ET AL. 2017, HANZL ET AL. 2015, LEICHT ET AL. 2020). Neben den beschriebenen Scanstrategien gibt es weitere Varianten wie Hexagone, konzentrische Kreise oder Fraktale (CATCHPOLE-SMITH ET AL. 2017, KUDZAL ET AL. 2017). Zur genaueren Beschreibung wird an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen.

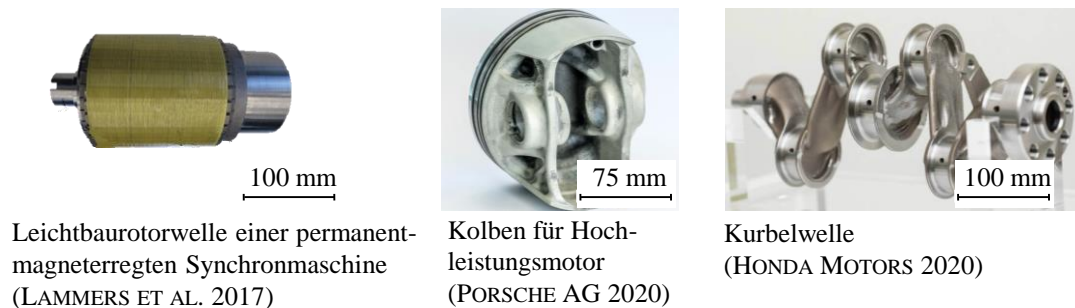
### 2.4.3 Herausforderungen und Anwendungsbeispiele

Das Laser-Strahlschmelzen eignet sich besonders für die Fertigung komplexer Bauteile, um Leistungsvorteile z. B. durch Leichtbau oder verbesserte Kühlung in thermisch anspruchsvollen Anwendungen zu erzeugen (GEBHARDT 2016). Darüber hinaus ist eine werkzeuglose flexible Fertigung von Komponenten möglich, wodurch Lieferzeiten und Lagerbestände z. B. von Ersatzteilen reduziert werden können (SCHNECK ET AL. 2019). Gleichzeitig hat das Laser-Strahlschmelzen unter den metallischen additiven Fertigungsverfahren die höchste Technologiereife (MUNSCH ET AL. 2020). Ein Hindernis für den breiten Einsatz wird in den hohen Fertigungskosten gesehen, die sich unter anderem aus hohen Pulvermaterial- und Anlagenkosten zusammensetzen (LANZA ET AL. 2017, BAUMERS ET AL. 2016).

Trotz dieses Hindernis werden bereits Kleinserien im Automobilbau implementiert und es wird eine stetige Prozessentwicklung mit steigender Produktivität und damit sinkenden Kosten prognostiziert (HAECKEL ET AL. 2017). Zum aktuellen Zeitpunkt stellt die mangelnde Materialvielfalt ein weiteres Hindernis dar. Gängige Werkstoffe wie der Stahl DP600 sind nicht verfügbar und es müssen Werkstoffe mit anderen Eigenschaftsprofilen verwendet werden (BOUQUET ET AL. 2014, TRAUTMANN 2021). Zudem werden die branchentypischen Anforderungen an die Reproduzierbarkeit nicht erfüllt. Einerseits betrifft dies die erzielbaren Materialeigenschaften, andererseits die Maßhaltigkeit der Bauteile. Die erzielbare relative Dichte und Zugfestigkeit sind dabei abhängig von der Packungsdichte der Bauplattform. Mit steigender Packungsdichte nehmen diese Kennwerte durch eine zunehmende Anzahl von Prozessnebenprodukten und deren Ablagerungen ab (HAECKEL ET AL. 2017). Dies steht im Gegensatz zu einer Optimierung der Wirtschaftlichkeit, die die maximale Ausnutzung des Bauraums erfordert (STITTGEN & SCHLEIFENBAUM 2021). Eine verbesserte Abfuhr der Nebenprodukte durch eine gesteigerte Strömungsgeschwindigkeit kann diesem Effekt bei hohen Packungsdichten entgegenwirken (SCHNIEDENHARN 2020). Die Maßhaltigkeit der Bauteile wird überwiegend durch die Kontrolle des Schmelzbads an den Bauteilrändern und auftretende Stufeneffekte im schichtweisen Aufbau bestimmt (DOWLING ET AL. 2020). In Untersuchungen zur Maßhaltigkeit von Bauteilen innerhalb einer Bauplatte konnten bisher ISO-Grundtoleranzklassen zwischen IT 11 und 13 ermittelt werden (ZONGO ET AL. 2018). Zur Steigerung der maschinenspezifischen Prozessfähigkeit kann der Methode nach ESCHEY gefolgt werden (ESCHEY 2013).

Dennoch kommt im Automobilbau eine Vielzahl an Bereichen und Bauteilen für die additive Fertigung in Frage, z. B. Kühler-, Fahrwerks- oder Antriebsstrangkomponenten sowie Betriebsmittel im Serienanlauf und in der Montage (MUNSCH

ET AL. 2018). Die BMW AG setzt das Laser-Strahlschmelzen in der Kleinserienfertigung von Radialpumpenrädern für die Deutsche Tourenwagen-Meisterschaft (DTM) sowie die Baureihe Z4-GT3 ein und nutzt dabei die gegebene Formfreiheit zur Optimierung des Strömungsverhaltens (BMW GROUP 2015). Ein Kipphelb zur Steuerung der Ein- und Auslassventile wurde von Renault Trucks leichtbauoptimiert und 600 Stunden im Prüffeld getestet (RENAULT 2017). Ebenfalls wurde der Kolben eines Hochleistungsmotors für den Rennsport von der Porsche AG mittels Laser-Strahlschmelzen gefertigt. Dieser wurde in der Gestalt optimiert, um die Kühlung in der Kolbenmulde zu verbessern und die Masse um 20 % zu reduzieren. Dies führte zu einer effizienteren Verbrennung und erhöhte die Motorleistung um 4,3 % (PORSCHE 2020). Honda Motors konnte die Masse einer Kurbelwelle für einen 4-Zylinder-Motor durch die Verknüpfung einer Topologieoptimierung und anschließender Fertigung mittels Laser-Strahlschmelzen um 50 % reduzieren (HONDA 2020) (vgl. Abbildung 15). LAMMERS ET AL. reduzieren durch den Einsatz der additiven Fertigung die Masse einer Rotorwelle einer Synchronmaschine um mehr als 30 % und verbessern dadurch das Ansprechverhalten zwischen wechselnden Betriebslasten deutlich (LAMMERS ET AL. 2017). Neben der Massereduktion durch eine innenliegende Gitterstruktur konnten auch die Wirbelstromverluste über die Auswahl der Gitterform (kubisch-raumzentriert gegenüber kubisch-flächenzentriert) eingestellt werden.



Leichtbaurotorwelle einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (LAMMERS ET AL. 2017)

Kolben für Hochleistungsmotor (PORSCHE AG 2020)

Kurbelwelle (HONDA MOTORS 2020)

*Abbildung 15: Anwendungsbeispiele aus dem Automobilbau, in denen die gewonnene Formfreiheit zur Reduktion der Bauteilmasse genutzt wurde*

Die Gemeinsamkeit der vorgestellten Anwendungsbeispiele ist die Nutzung der Formfreiheit zur Steigerung der Leistung oder Effizienz des Gesamtsystems durch verbesserte Funktionserfüllung z. B. durch Kühlungs- oder Strömungseigenschaften oder Reduzierung der Bauteilmasse. Auf diese Weise wird der Wirkungsgrad des Systems verbessert und ein verringerter Kraftstoff- oder Energieverbrauch erreicht, wodurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden oder die batterieelektrische Reichweite erhöht wird (LAMMERS ET AL. 2017).

### 3 Stand der Technik und Forschung

#### 3.1 Strukturelemente und Leichtbau im Laser-Strahlschmelzen

Die additive Fertigung eignet sich besonders, um Form- und Fertigungsleichtbau zu verknüpfen (THOMPSON ET AL. 2016a). In den Technologien der additiven Verfahren kann dafür das Laser-Strahlschmelzen eingesetzt werden, da bereits geringe Wandstärken und filigrane Merkmale gefertigt werden können (MUNSCH ET AL. 2020). Dabei kann der Formleichtbau auf unterschiedlichen geometrischen Ebenen verwendet werden. Diese lassen sich in mikro-, meso- und makroskopische Dimensionen einteilen (siehe Abbildung 16) (REINHART & TEUFELHART 2011, ENGELBRECHT ET AL. 2009).



Abbildung 16: Größenordnung der Leichtbaustrukturen beim Laser-Strahlschmelzen (nach REINHART & TEUFELHART 2011)

Je nach Größenbereich der **Leichtbaustruktur** ist eine Anpassung der Fertigungsparameterkombination notwendig, um die Herstellbarkeit zu gewährleisten (MERKT 2015). Zur Fertigung von makroskopischen Elementen sind die Regeln von *Design for AM* (DfAM) zu befolgen, welche die allgemeinen Fertigungsrestriktionen des Laser-Strahlschmelzens beschreiben (KRANZ ET AL. 2015). Diese Restriktionen umfassen Materialübergänge, Bohrungen und Überhänge und müssen materialspezifisch ermittelt werden (ADAM & ZIMMER 2015). Gitter- und Wabenstrukturen als mesoskopische Strukturen benötigen materialspezifisch eine niedrigere Energiedichte als Volumenkörper und angepasste Scanstrategien wie Punktbelichtung, da es ansonsten durch kürzere Scanvektoren zu Porosität und

Maßabweichungen kommt (ABELE ET AL. 2015, MERKT 2015, SING ET AL. 2018). Mikroskopischer Leichtbau lässt sich durch die Variation der Bauteildichte erzielen. Mit dieser Methode sind sogenannte funktional gradierten Werkstoffe (*Functional Graded Materials*, FGMs) herstellbar, die über Dichtegradienten verfügen (ZHANG ET AL. 2019). Dies gelingt durch die Anpassung des Belichtungsparametersatzes indem gezielt Poren erzeugt werden z. B. durch ein nur teilweises Aufschmelzen mit einem Parametersatz mit ungenügendem Energieeintrag oder durch Erzeugung von Schweißwurzelporosität durch einen Parametersatz mit überhöhtem Energieeintrag. Leichtbau ist bei diesen Ansätzen meist nur ein Nebeneffekt, da ein offenes Porennetz hergestellt werden soll, um eine Durchlässigkeit für Druckluft oder eine Kapillarwirkung zur Aufnahme von Flüssigkeit zu erzeugen (KLAHN 2015, SCHMITT ET AL. 2019b).

Makroskopische Leichtbaustrukturen können durch eine Strukturoptimierung erstellt werden, die in die drei Methoden der Topologie-, Form- und Größenoptimierung eingeteilt ist (TANG & ZHAO 2016). Verbreitet in der Anwendung ist dabei die Topologieoptimierung, bei der Lage und Anordnung von Material in einem gegebenen Designraum angepasst werden (THOMPSON ET AL. 2016a). Zur detaillierten Erläuterung und zum Vergleich der eingesetzten Algorithmen wie SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*), ESO (*Evolutionary Structural Optimization*) oder BESO (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization*) sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (HE & LIU 2008, HUANG & XIE 2010, PANESAR ET AL. 2017).

Während Strukturoptimierungen durchgehend rechnergestützt ausgeführt werden, sind Methoden der Bionik, die ebenso für die makroskopische Bauteiloptimierung eingesetzt werden können, in den ersten Schritten der ‚Analogiewahl‘ und ‚Abstraktion‘ anwendergetrieben (NACHTIGALL & WISSER 2013). Erst in späteren Schritten wird die Bauteilgeometrie einem rechnergestützten Festigkeitsnachweis unterzogen (WAWERS 2020). Die Verknüpfung der Bionik mit der additiven Fertigung führt zur Entwicklung neuer Konstruktionsmethoden wie BioTRIZ (KAMPS ET AL. 2017). Im Gegensatz zur Strukturoptimierung kann die Bionik auch zur Integration oder Verbesserung von weiteren Funktionen wie Kühlung, Dämpfung oder Wärmeleitung genutzt werden (LI ET AL. 2017, KAMPS ET AL. 2016). In der Analogieauswahl und der Umsetzung der Gestaltung obliegt es allerdings der Anwenderin, die materialspezifischen DfAM-Regeln einzuhalten.

Zur Leichtbauoptimierung in der mesoskopischen Größenordnung werden in der Regel Gitter- und Wabenstrukturen oder Minimalflächenkörper eingesetzt (TANG & ZHAO 2016). Oft werden periodische Einheitszellen zu einer Gitterstruktur mit



Strebendurchmesser im Bereich 0,1–5 mm im Designbereich zusammengefügt (YAN ET AL. 2014). Diese Strukturen besitzen zwar ein hohes Leichtbaupotenzial, allerdings wirkt der Übergangsbereich von Gitter zu Bauteil als Kerbe. Erst aufwändige Optimierungen der einzelnen Schnittstellen verringern diesen negativen Einfluss (MERKT 2015). Die Verwendung von gradierten Gitter- und Wabenstrukturen ermöglicht zusätzlich eine optimale Anpassung an die tatsächliche Belastung des Bauteils (MASKERY ET AL. 2016). In der Auslegung sind besonders adaptive Gitterstrukturen entlang des Kraftflusses geeignet (REINHART & TEUFELHART 2013). Bei dieser Methode wird die Gitterstruktur in einem Entwurfsbereich entlang des Kraftflusses orientiert und mittels Größenoptimierung ein optimaler Durchmesser der Gitterstreben erzeugt. Dadurch verteilt sich die Spannung gleichmäßig auf jede Strebe der gesamten Struktur (TEUFELHART 2016). Durch die Gitterstrukturen und die anschließende Triangulation zur Baudatenvorbereitung entstehen große Datenmengen, sodass spezielle Ansätze zur Reduktion der Datenmenge entwickelt wurden (CHOUGRANI ET AL. 2017).

Im mikroskopischen Bereich haben explizite Auslegungsmethoden Grenzen. Die Beschreibung der Struktur gelingt nur über Umwege (z. B. CT-Messung eines Schaums) und die additive Fertigung führt zu großen Formabweichungen, wodurch die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften erschwert wird (HERNÁNDEZ-NAVA ET AL. 2015). Bisherige Methoden beschreiben die Fertigung und nachträgliche Eigenschaftsbestimmung von Probekörpern, die aufwändig iteriert werden, bevor die Umsetzung im Bauteil erfolgen kann (KLAHN 2015).

Um die gegebenen Fertigungsrestriktionen zu überwinden, können **Stützstrukturen** (auch **Supportstrukturen**) eingesetzt werden, welche die Baubarkeit von Überhängen ermöglichen (VDI 3405 BLATT 2). Die Parametersatzentwicklung für Stützstrukturen, die für komplexe Bauteile notwendig sind, ist dabei im Verhältnis zu Volumenkörpern vernachlässigt und ein gesamtheitliches Vorgehen ist nicht bekannt. MORGAN ET AL. entwickelten einen Stützstrukturparametersatz für den Stahl 17-4 PH durch visuelle subjektive Bewertung der Geradheit, Konsistenz und Spratzerbildung bei Einzelspuren (MORGAN ET AL. 2017). Zwei geometrische Varianten der Linienunterstützung wurden auf Basis der Entfernbarekeit anhand eines subjektiven quantitativen Abstufungssystems von 0-5 bewertet, und es wurde festgestellt, dass die Verbindung zum Bauteil einen hohen Einfluss auf die Gesamtfestigkeit hat (JÄRVINEN ET AL. 2014). Zugversuche an Ti6Al4V-Gitterstützstrukturen bei sehr geringen Gittergrößen (0,35 und 0,7 mm) zeigten eine Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Gitterdichte (BOBBIO ET AL. 2017). LINDECKE ET AL. leiteten Richtlinien für Ti6Al4V-Stützstrukturen mit Schwerpunkt auf die Verbin-

dungselemente zum Vollmaterial ab und zeigten, dass sich bei verdoppelter Grenzfläche die absolute Verbindungsfestigkeit um 12 % erhöht (LINDECKE ET AL. 2018). Ein ganzheitlicher Ansatz zur Parametersatzbestimmung, Quantifizierung der Eigenschaften (Festigkeit und Entfernbarkeit) und zur Auswahl von Stützstrukturen ist nicht verfügbar.

### 3.2 Verarbeitung von Einsatzstählen im Laser-Strahlschmelzen

Im Laser-Strahlschmelzen werden Aluminium-, Titan-, Nickelbasislegierungen und Stähle verarbeitet (WOHLERS 2021). Innerhalb der Stähle sind industriell rostfreie Stähle wie 1.4404 und 1.4548 (316L und 17-4 PH) sowie Werkzeugstähle wie 1.2709 verbreitet (BAJAJ ET AL. 2020, SCHNECK 2021). Für gesteigerte mechanische und Verschleißigenschaften werden kohlenstoffhaltige Stähle verwendet, da Kohlenstoff (C) als Legierungselement interstitiell lösbar ist und einerseits Carbide und andererseits Martensit zur Härtesteigerung bilden kann (BARGEL & SCHULZE 2018). Nachteilig für das Laser-Strahlschmelzen ist die herabgesetzte Schweißbarkeit, die durch das Kohlenstoffäquivalent ( $C_{eq}$ ) bewertet werden kann. Es lässt sich nach SCHULZE 2010 für Kohlenstoff-Mangan-Stähle wie folgt bestimmen:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}. \quad (9)$$

Liegt das  $C_{eq}$  unterhalb von 0,45 %, gelten Stähle als gut schweißbar und Vorwärmtemperaturen sind generell nicht notwendig. Im Bereich von 0,45–0,6 % liegt eine reduzierte Schweißbarkeit vor und Vorwärmtemperaturen im Bereich 100–250 °C sollen zur Vermeidung von Heißrissen verwendet werden. Bei einem  $C_{eq}$  von mehr als 0,6 % wird von einer schlechten Schweißbarkeit ausgegangen und Vorwärmtemperaturen von mehr als 250 °C sind als Ausgleich notwendig (SCHULZE 2010).

Für die Zahnradherstellung werden meist Einsatzstähle mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,15–0,25 Ma.-% verwendet (FELTEN 2018). Daraus ergibt sich ein  $C_{eq}$  von 0,5–0,75 % und eine eingeschränkte Schweißbarkeit. Mit optimierten Prozessparameterkombinationen gelingt es einigen Autoren, Einsatzstähle und Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt im Laser-Strahlschmelzen nahezu poren- und rissfrei zu verarbeiten. Ergebnisse und Ansätze zur Verarbeitung von Stählen mit dem Fokus

auf Einsatzstähle werden im folgenden Abschnitt vorgestellt. Dazu wurden 45 Literaturquellen ausgewertet, in denen das Laser-Strahlschmelzen von Stählen bis zu einem Kohlenstoffgehalt von 1,3 Ma.-% beschrieben wird. Eine Übersicht der verwendeten Parametersätze, Schutzgase, Bauplattentemperaturen und der resultierenden Bauteildichten ist in Tabelle 20 im Anhang aufgeführt.

Aus der Auswertung der teilweise nur unvollständig angegebenen Fertigungsparametersätze geht ein heterogenes Bild bei der Nutzung der verwendeten Bauplattentemperaturen hervor. Es wird deutlich, dass die reduzierte Schweißbarkeit mit steigendem Kohlenstoffgehalt für eine porenfreie Verarbeitung nicht zwangsläufig mit einer hohen Bauplattentemperatur kompensiert werden muss. Es zeigt sich jedoch, dass eine höhere Aufbaurate und eine reduzierte Rissanzahl bei Vorheiztemperaturen über 300 °C bei einem Vergütungsstahl mit 0,4 Ma.-% Kohlenstoff erzielt werden konnten (DAMON ET AL. 2019). Ein ebenso heterogenes Bild ergibt sich bei der Art des Schutzgases. In den Literaturdaten (n=45) verwenden ca. 28 % den günstigeren Stickstoff, während 71 % Argon nutzen. Der Vergleich der Schutzgase wird allerdings nur in einer Quelle durchgeführt, ist aber für die Verarbeitung von höherlegierten Einsatzstählen notwendig (SCHEITLER ET AL. 2016). Eine Systematik in der Wahl des Schutzgases ist nicht erkennbar und stellt Anwenderinnen vor Herausforderungen. Außerdem werden Wechselwirkungen mit nachgelagerter Wärmebehandlung nicht betrachtet (MEREDITH ET AL. 2018).

Ein vergleichbares Bild ergibt sich bei der Betrachtung der angewandten Energiedichte. In einem Großteil der Quellen wird ein Bereich von 65–105  $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  als optimal angegeben. Nur wenige Arbeiten liegen deutlich über diesem Energiebereich:

- JELIS ET AL. bei der Verarbeitung von 36CrNiMo4 mit 141  $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$
- CHEN ET AL. bei der Prozessierung von 50CrNi4Mo mit 172  $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$
- GEENEN ET AL. bei der Verarbeitung des Stahls M3:2 HSS mit 218  $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$   
(JELIS 2017, CHEN ET AL. 2017, GEENEN ET AL. 2019).

In diesen Fällen wird mit steigendem Kohlenstoffgehalt die eingesetzte Energiedichte erhöht. Dies steht im Widerspruch zur verbesserten Benetzbarkeit der Schmelze in Stählen mit steigendem Kohlenstoffgehalt, die mit einer Reduktion der notwendigen Energiedichte korreliert (NAKAMOTO ET AL. 2009).

Dieses uneinheitliche Bild setzt sich in der Fokussierung auf die Einsatzstähle fort. Einerseits werden unterschiedliche Bauplattentemperaturen bis 150 °C verwendet, ohne dass eine Auswahl der Temperatur entsprechend der Anwendung erfolgt (Ab-

bildung 17 a). Andererseits werden diese Stähle mit sehr unterschiedlichen Parameterkombinationen verarbeitet und es ist keine Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt erkennbar (Abbildung 17 b).

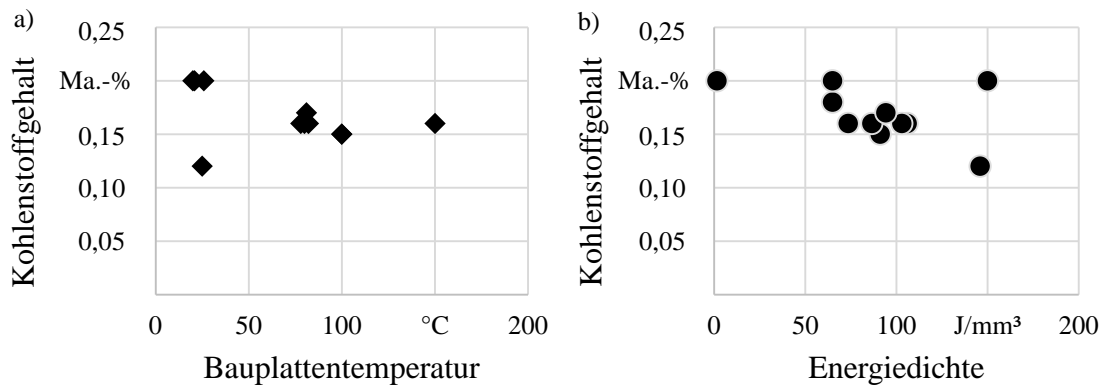


Abbildung 17: Einsatzstähle a) Verarbeitung in Abhängigkeit von der Bauplattentemperatur b) Verwendete Energiedichte in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt

SCHEITLER ET AL. verarbeiteten den Einsatzstahl M50NiL (0,12 Ma.-% C) aus der Wälzlagerindustrie ohne Bauplattformvorheizung und mit einer Energiedichte von  $146 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ . Es gelang, eine relative Bauteildichte von 99,0 % zu erreichen, allerdings war ein Wechsel von Stickstoff zu Argon als Schutzgas notwendig. Dies verringert den Temperaturgradienten über die reduzierte Wärmeleitfähigkeit von Argon (Argon  $0,0177 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ; Stickstoff  $0,0258 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ) (SCHEITLER ET AL. 2016). Der Einsatzstahl 18MnNiSiCr (0,15 Ma.-% C) wurde bei einer Bauplattentemperatur von 100 °C durch WU ET AL. ohne Risse verarbeitet, zeigte jedoch nur geringe relative Bauteildichten von 97 %. Die Nutzung einer höheren Energiedichte als  $92 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  zur Reduktion der Poren, die vornehmlich als Lack-of-Fusion-Poren identifiziert wurden, wird als Lösung vorgeschlagen (WU ET AL. 2015). Kamps verarbeitete den Einsatzstahl 16MnCr5 in mehreren Arbeiten ohne Risse und mit hohen relativen Bauteildichten von mehr als 99,5 %. Es wurden dabei eine Energiedichte von  $106 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  und eine Bauplattentemperatur von 80 °C gewählt. SCHMITT ET AL. zeigten, dass die Verarbeitung von 16MnCr5 in einem breiten Parameterfenster von 80-110  $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  bei 80 °C Bauplattentemperatur möglich ist. Außerdem wird aufgeführt, dass eine Verringerung der Streifen- und Schachbrettbreite die resultierende Härte verringert (SCHMITT ET AL. 2018). In weiteren Untersuchungen durch BARTELS ET AL. bei 150 °C Bauplattentemperatur wurde der Einsatzstahl 16MnCr5 bei einer noch niedrigeren Energiedichte von  $74 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  verarbeitet. Trotz der erhöhten Bauplattentemperatur bildete sich ein martensitisches Gefüge, wie auch bei KAMPS

2018 und SCHMITT ET AL. 2018 (BARTELS ET AL. 2020). AUMAYR ET AL. prozessierten den Stahl E185 AMPO, vergleichbar mit 20MnCr5 (0,2 Ma.-% C), bei Raumtemperatur und erzielten relative Bauteildichten von 99,98 % mit dem Hinweis auf ein breites Parameterfenster zur anwendungsspezifischen Optimierung der Parametersätze. Es wird ein bainitisch-martensitisches Gefüge mit sichtbaren Schweißbahnen korrespondierend zu der verwendeten Schichtstärke beschrieben. Basierend auf der schnellen Abkühlung im Prozess wird ein ausgeglichenes Verhältnis von Zugfestigkeit, Härte, Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit ermittelt (AUMAYR ET AL. 2020). Der Einsatzstahl 20MnCr5 (0,22 Ma.-% C) wurde von KLUGE ET AL. ohne Angabe des benutzten Fertigungsparametersatzes unter Raumtemperatur mit einer relativen Bauteildichte von 99,7 % verarbeitet. Die Nutzung einer Bauplattentemperatur von 170 °C verringerte den Verzug an Probekörpern (Cantilever vergleichbar mit BUCHBINDER ET AL. 2011) um ca. 30 % und erhöhte die Bruchdehnung bei reduzierter Zugfestigkeit (KLUGE ET AL. 2017). Der Einsatzstahl 24CrNiMo (0,24 Ma.-% C) wurde von TANG ET AL. mit einer Energiedichte von  $56 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  zu einer relativen Bauteildichte von 99,14 % verarbeitet. Dabei erwies sich die Verwendung eines orthogonalen Belichtungsmusters als vorteilhaft gegenüber einer spiralförmigen Strategie. Ein Gefüge aus unterem Bainit mit hoher Festigkeit und unregelmäßig orientierten Körnern sorgt für homogene mechanische Eigenschaften (TANG ET AL. 2020). Es zeigt sich, dass in der betrachteten Literatur eine Erhöhung der Bauplattentemperatur nicht mit einer Verringerung der Energiedichte einhergeht (siehe Abbildung 18).

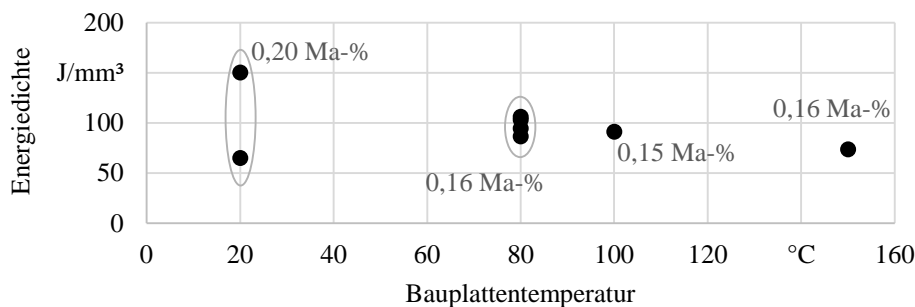


Abbildung 18: Verwendete Energiedichte in Abhängigkeit der Bauplattentemperatur für Einsatzstähle

Diese Aussage ist allerdings nur auf die Gruppe der Einsatzstähle und für den betrachteten Temperaturbereich bis maximal 160 °C gültig. Die Energiedichte als Bewertungsmerkmal ist eingeschränkt, da die Bauplattentemperatur des Laser-Strahlschmelzens nicht berücksichtigt wird. Fortschrittlichere Ansätze wie von KING ET AL. (Nutzung der normalisierten Enthalpie) beziehen die Bauplattentemperatur ein (KING ET AL. 2014). Nachteilig ist bei diesem Ansatz die Vielzahl an

benötigten experimentellen Materialdaten und Prozessinformationen, welche in keiner der untersuchten Quellen in ausreichendem Maße angegeben wurde.

Zusammenfassend lässt sich aus den Literaturquellen ableiten, dass die Verarbeitung von Einsatzstählen (0,15–0,25 Ma.-%) durch eine Vielzahl von Parameterkombinationen möglich ist (KAMPS 2018, SCHMITT ET AL. 2018, BARTELS ET AL. 2020). AUMAYER ET AL. führen an, dass dieses breite Parameterfenster für anwendungsspezifische Optimierungen genutzt werden kann, ohne diesen Gedanken weiter auszuführen (AUMAYR ET AL. 2020). Das breite Parameterfenster kann beispielhaft dafür genutzt werden, die Eigenspannung zu reduzieren, da MUGWAGA ET AL. eine Korrelation zwischen Lasergeschwindigkeit und Bauteilverzug herstellen (MUGWAGWA ET AL. 2018). Einschränkend lässt sich festhalten, dass Limitierungen bei den entwickelten Parametersätzen bestehen, da diese nur an Probekörpern (beispielsweise 10 x 10 x 10 mm<sup>3</sup> Würfel- oder Zugproben) validiert wurden. Bei zunehmender Bauteilgröße steigt die Menge an Prozessnebenprodukten, durch die die Dichte reduziert wird (LUTTER-GÜNTHER 2020, HAECKEL ET AL. 2017). Eine Methode zur anwendungs- und bauteilspezifischen Auswahl geeigneter Parametersätze über Probekörper hinaus ist für Anwender nicht vorhanden. Dies ist besonders zutreffend, sobald Leichtbaustrukturen verschiedener Größenordnung (mikro-, meso- oder makroskopisch) eingesetzt werden sollen.

### 3.3 Einflussfaktoren auf die Materialeigenschaften im Laser-Strahlschmelzen

Beim Laser-Strahlschmelzen wird pulverförmiges Material selektiv durch die Einwirkung eines Laserstrahls aufgeschmolzen. Im Fall von Stählen kann die Temperatur bis nahe an den Siedepunkt von Eisen oder Legierungselementen heranreichen und diesen im Tiefschweißen lokal überschreiten (SCIPIONI ET AL. 2017a). Eine derart konzentrierte Energiezufuhr führt zu hohen Aufheiz- und anschließend hoher Abkühlgeschwindigkeiten; letztere liegen im Bereich von bis zu 40 K/ $\mu$ s (HOOPER 2018). Durch die rasche Abkühlung werden die Mikrostruktur sowie die Materialeigenschaft festgelegt (MERTENS ET AL. 2020). Im Allgemeinen gilt, dass mit zunehmender Energiebereitstellung die Abkühlgeschwindigkeit abnimmt (GU 2015).

Es findet eine Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung statt. Beim Energietransport zur Bauplattform spielt die Wärmeleitung durch einen Festkörper (bereits verfestigtes Bauteil) die wesentliche Rolle. Das umlie-

gende Pulverbett hat wegen der Lücken zwischen den Partikeln eine niedrige Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Vollmaterial und es kommt zur fast ausschließlichen Erstarrung in Baurichtung. Die Wärmeleitfähigkeit hängt maßgeblich von den Faktoren Pulverbettdichte, Temperatur, Art des Schutzgas und Druck in der Prozesskammer ab (WEI ET AL. 2018, PAUZON 2021, LIU ET AL. 2022). Je nach Literaturquelle und Material werden dabei ca. 1-5 % der Wärmeleitfähigkeit des Vollmaterials erreicht (ALKAHARI ET AL. 2012, WEI ET AL. 2018). Die Lücken im Pulverbett sind durch Schutzgas gefüllt, das die Wärmeleitfähigkeit des Pulverbetts beeinflusst. Dabei verbessert Helium die Wärmeleitung des umliegenden Pulvers um 300 % im Vergleich zu Argon oder Stickstoff (WEI ET AL. 2018).

Es entsteht ein sehr feinkörniges Gefüge in zellulärer oder dendritischer Ausprägung, da das Produkt aus Temperaturgradient  $G$  und Erstarrungsrate  $R$  hoch ist und außerdem ein mittleres Verhältnis der Größen vorliegt (SANDER 2018). Für Einsatzstähle liegt bei diesen Temperaturgradienten und Abkühlraten daher ein bainitisches-martensitisches Gefüge nahe (ROOS & MAILE 2015). Dies wird durch die Literatur bestätigt und es zeigen sich darüber hinaus Formen von Seigerungen und Karbidbildungen an den Schmelzbadgrenzen (WANG & KELLY 2016, AUMAYR ET AL. 2020). Im Laufe des schichtweisen Aufbaus erfährt das Material in unterliegenden Schichten eine fortlaufende Erwärmung und Abkühlung (siehe Abbildung 19).

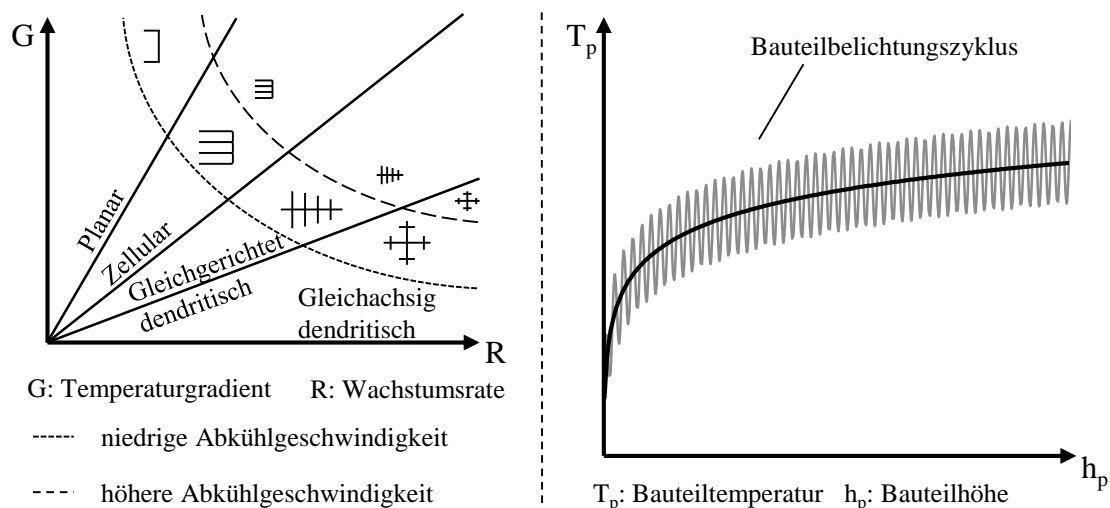


Abbildung 19: Ausbildung des Gefüges in Abhängigkeit von Temperaturgradient und Wachstumsrate (links); Steigende Bauteiltemperatur mit zunehmender Bauhöhe (rechts) (SANDER 2018, SCHMITT ET AL. 2020a, DAMON ET AL. 2019)

Dies führt über den Bauprozess hinweg zu einem Anstieg der Bauteiltemperatur, wodurch es zu Umwandlungsvorgängen im Material kommen kann (DAMON ET

AL. 2019). Ändert sich die Belichtungszeit pro Schicht (*Inter Layer Time*), kann dies Auswirkungen auf die Bauteilhärte und Porosität haben (MOHR ET AL. 2020). Die Entstehung des Gefüges ist ein komplexes Zusammenspiel aus Erstarrung, Wiederaufschmelzen und in-situ Wärmebehandlung, das es für das jeweilige Material und die Anwendung zu beherrschen gilt.

Der entstehende Temperaturgradient im Laser-Strahlschmelzen hat damit maßgeblichen Einfluss auf die Bauteilqualität. Einerseits kann der Temperaturgradient durch fertigungsbedingte Faktoren beeinflusst werden, andererseits wird er durch die Geometrie des Bauteils selbst bestimmt.

### 3.3.1 Fertigungsbedingte Einflüsse auf die Materialeigenschaften

Die Bauteilqualität im Laser-Strahlschmelzen wird durch eine Vielzahl an fertigungsbedingten Einflüssen bestimmt. REHME zählt mehr als 150 Einzelgrößen auf und ordnet diese den Bereichen Mensch, Maschine, Milieu, Material, Methode und Bauteil zu (REHME 2009). Entscheidende Einflussfaktoren sind in Abbildung 20 dargestellt.

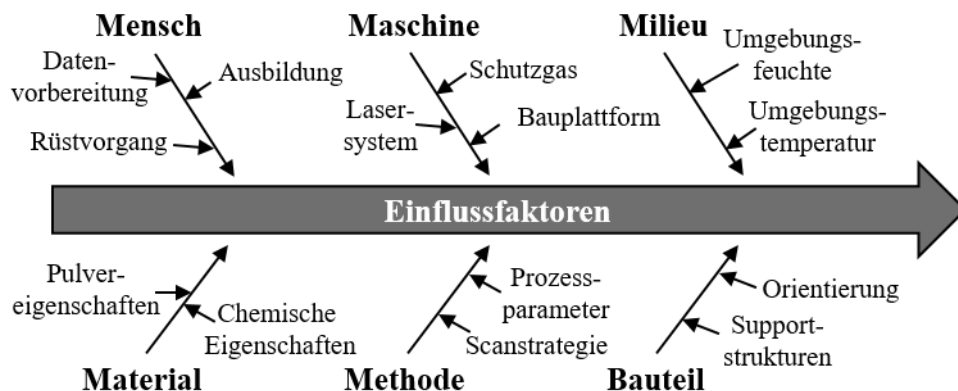


Abbildung 20: Einflussfaktoren auf die Materialeigenschaften im Laser-Strahlschmelzen

KROL ET AL. identifizierten als Einflussgrößen auf die Maßhaltigkeit die Scange-schwindigkeit, die Stützstruktur, die Bauplattentemperatur und die Scanstrategie (KROL ET AL. 2013). Dabei wird eine qualitative Bewertung der Einflussgrößen durch eine Literaturanalyse vorgeschlagen. Abbildung 96 im Anhang stellt eine Literaturanalyse zu den Einflussfaktoren dar (EISEN 2009, REHME 2009, BADROSSAMAY ET AL. 2009, SEHRT 2010, MUNSCH 2013, ABOULKHAIR ET AL. 2014, MERKT 2015, HEB 2015, KRAUSS 2016, BOUREL ET AL. 2017). Die Autoren weisen übereinstimmend den Einflussfaktoren aus dem Lasersystem, z. B. Laserleistung oder Lasergeschwindigkeit, große Bedeutung zu. Darüber hinaus

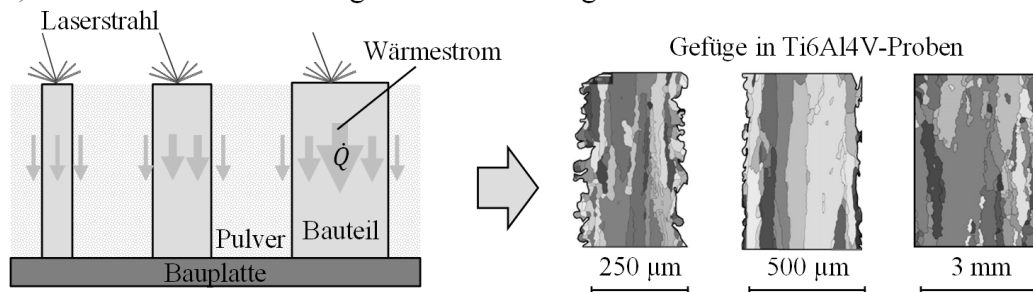


können weitere relevante regelbare Prozessgrößen im Laser-Strahlschmelzen identifiziert werden: Spurbstand, Scanstrategie, Schichtstärke, Art des Schutzgases, Bauplattentemperatur und Stützstrukturen.

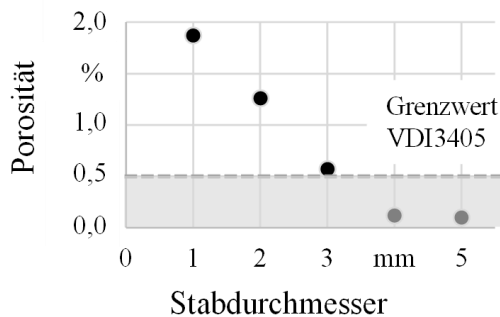
### 3.3.2 Geometriebedingte Einflüsse auf die Materialeigenschaften

Im Gegensatz zu spanenden Verfahren wird beim Laser-Strahlschmelzen nicht nur die Bauteilgeometrie geschaffen, sondern durch die Abkühlung aus der Schmelze auch die Mikrostruktur des Bauteils definiert (BARBA ET AL. 2020). Der Einfluss der Bauteilgeometrie auf die resultierende Wärmeabfuhr, und damit auf die Mikrostruktur sowie die mechanischen Eigenschaften ist in Abbildung 21 zu sehen.

a) Veränderte Wärmeleitung führt zu inhomogener Mikrostruktur



b) Erhöhte Porosität



c) Oberflächenrauheit und resultierende Spannungskonzentrationen

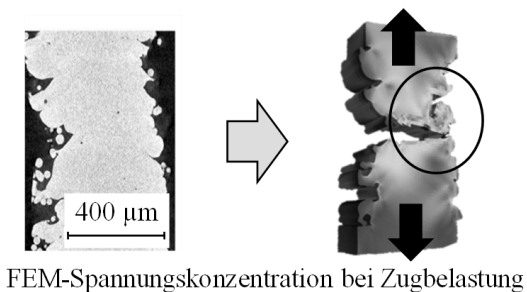


Abbildung 21: Geometriebedingte Einflüsse a) Einfluss der Merkmalsgröße (BARBA ET AL. 2020) b) Erhöhte Porosität (DONG ET AL. 2018) c) Zunahme des Oberflächeneinflusses (ROACH ET AL. 2020)

YEUNG ET AL. stellen die These auf, dass scharfe Ecken und Überhänge die Wärmeleitung beeinflussen, und leiteten daraus einen Algorithmus zur Anpassung des Fertigungsparametersatzes für den Werkstoff IN625 ab, der zu einer Vermeidung von Kantenbildung führt (YEUNG ET AL. 2019). Die relative Bauteildichte und die mechanische Eigenschaft werden nicht betrachtet, obwohl die Laserleistung teilweise stark reduziert wird. Wird der Bauprozess für hohe Bauteile (> 100 mm) betrachtet, ergibt sich für den Stahl 1.440 (316L), dass sich ein Wärmestau in den

oberen Bereichen ausbildet, der mit einer niedrigeren Festigkeit korreliert (MOHR ET AL. 2020). PHUTELA ET AL. zeigten für das Laser-Strahlschmelzen von Ti6Al4V, dass die Duktilität mit der Merkmalsgröße abnimmt. Allerdings stieg in dieser Untersuchung ebenfalls die Porosität der Merkmale mit abnehmender Merkmalsgröße signifikant (von 0,3 auf 4,77 %), was auf nicht optimierte Parametersätze für dünne Strukturen schließen lässt (PHUTELA ET AL. 2019). Ein ähnlicher Effekt der steigenden Porosität bei kleinen Merkmalen ist bei der Verarbeitung der Aluminiumlegierung AlSi10Mg bekannt (DONG ET AL. 2018). Sinkt die Größe der Merkmale, so nimmt neben der Porosität auch der Einfluss der Oberfläche zu, was eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften nach sich zieht. Die Rauigkeit der additiven Oberfläche führt dabei zu Spannungskonzentrationen in der Randschicht und wirkt letztlich rissinitiiierend (ROACH ET AL. 2020). Die Beeinflussung der Wärmeleitung kann auch zur Steuerung der Materialeigenschaften genutzt werden. BABUSKA ET AL. beeinflussten durch Stützstrukturen an der Prüffläche von Zugproben, die nachträglich entfernt wurden, die Duktilität der binären Fe-50Co-Legierung (BABUSKA ET AL. 2020).

Insgesamt zeigt sich, dass die Bauteilgeometrie selbst einen Einfluss auf die Wärmeabfuhr im Laser-Strahlschmelzen und damit auf die resultierende Materialqualität hat. Für Stahlwerkstoffe und insbesondere Einsatzstähle liegen hierzu noch keine Daten vor.

### 3.4 Tragfähigkeit von additiv gefertigten Verzahnungen

Die Tragfähigkeit von Verzahnungen ergibt sich aus der erreichbaren Belastbarkeit im Zahnfuß, der Zahnflanke (Grübchenbildung) und dem Widerstand gegenüber Fressen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Für Verzahnungen, die durch das Laser-Strahlschmelzen gefertigt wurden, steht bisher nur eine sehr kleine Datenbasis zur Verfügung.

KLUGE ET AL. beschreiben die Fertigung und die Prozesskette für Verzahnungen aus dem Werkstoff 20MnCr5. Nach dem Durchlaufen der Prozesskette des Laser-Strahlschmelzens und des Einsatzhärtens wurde eine reduzierte Kernhärte ermittelt. Die resultierende Zahnfußtragfähigkeit im Pulsatorversuch erfüllte „mittlere Materialqualitäten“ bei ungewöhnlich hoher Streubreite, ohne genauere Angaben der resultierenden Zahnfußdauerfestigkeit (KLUGE ET AL. 2017). Die experimentellen Untersuchungen von KAMPS zeigen quantitativ eine reduzierte Zahnfußtragfähigkeit von 12 % im Vergleich zu konventionellen Referenzverzahnungen (KAMPS 2018). Weiter reduzierte Tragfähigkeiten mit dem Werkstoff 16MnCr5

zeigen Untersuchungen von KONOWALZYK ET AL. und KLEE & LANTZSCH. Beide Untersuchungen erreichten nur ca. 50 % der Zahnfußtragfähigkeit von konventionellen Referenzverzahnungen (KONOWALCZYK ET AL. 2017, KLEE & LANTZSCH 2021). Eine Rissinitiierung erfolgte in allen Fällen an Fehlstellen aus dem Laser-Strahlschmelzprozess. Bei geschliffenen Verzahnungen aus dem Werkstoff 30CrNiMo8 berichten DENNIG ET AL. von einer gesteigerten Tragfähigkeit (+10 %) der AM-Verzahnungen, ohne allerdings die Versuchsbedingungen vollständig für eine Vergleichbarkeit zu dokumentieren (DENNIG ET AL. 2022). In Versuchen mit Verzahnungen aus dem Werkstoff X5CrNiCuNb16-4 (17-4 PH) wird von einer Verringerung der dynamischen Belastbarkeit durch Fehlstellen aus dem Laser-Strahlschmelzen berichtet, ohne ein vollständiges Wöhlerdiagramm zu bestimmen (CONCLI ET AL. 2021). In einer statischen Verspannprüfung versagten laser-strahlgeschmolzene Verzahnungen aus AlSi10Mg innerhalb der verwendeten Leichtbaustrukturen (Gitterwabe, Spiralstruktur oder Minimalflächenkörper) oder an der Anbindungsstelle zum Zahnkranz (BULDUK ET AL. 2022). Details zur Bestimmung des Designraums und der Auswahl der Leichtbaustrukturen werden nicht beschrieben. Es zeigt sich, dass ohne geeignete Auslegungsmethoden und ermittelten geometrischen Grenzwerten die Leichtbaustruktur als Schwachstelle der Konstruktion wirkt.

Festzuhalten ist, dass die Zahnfußtragfähigkeit von AM-Verzahnungen in der Literatur einer sehr starken Streuung unterworfen ist. Dies resultiert aus nicht ausreichend abgesicherten Festigkeitskennwerten der Zahnfußtragfähigkeit. Für die Zahnflankentragfähigkeit sind keine Festigkeitskennwerte zum aktuellen Stand bekannt. Anwendende stehen vor einer großen Herausforderung bei der Auslegung und Gestaltung der Prozesskette zur Fertigung von AM-Verzahnungen mit gesicherter Festigkeit.

### 3.5 Fazit und Handlungsbedarf

Anhand des dargestellten Stands der Technik zeigt sich, dass einige Methoden bekannt sind, um Leichtbaustrukturen singulär zu fertigen. Allerdings liegt keine ganzheitliche Betrachtung der Anforderungen eines Bauteils zugrunde und eine anwendungsspezifische Auswahl erfolgt nicht. Supportstrukturen werden im Kontext der Parametersatzentwicklung nicht ganzheitlich betrachtet und nicht im Verbund mit Vollmaterialparametersätzen entwickelt. Gleichzeitig fehlt ein quantitatives Bewertungssystem zur Auswahl von Supportparametersätzen und Geometrien. Der Einfluss der Fertigungsparameter auf die Entfernbarkeit und die Festig-

keit von Supportstrukturen für Einsatzstähle ist nicht bekannt und stellt Anwenderinnen vor Herausforderungen bei der Herstellung von komplexen Leichtbaugeometrien. Vereinzelt Untersuchungen zum Einfluss der Geometrie der Stützstrukturen liegen vor, allerdings eingeschränkt durch semi-quantitative Untersuchungsmethoden. Eine Einbindung in eine übergeordnete Parametersatzentwicklung für neue Werkstoffe erfolgt nicht.

Die Verarbeitung von kohlenstoffhaltigen Stählen und insbesondere Einsatzstählen ist in der Literatur beschrieben. Allerdings wird der Übertrag von einfachen Probekörpern zu komplexen Bauteilgeometrien in der Regel nicht durchgeführt, obwohl ein großes Parameterfenster mit dem Potenzial zur bauweisenspezifischen Optimierung und Auswahl der Fertigungsparametersätze vorhanden ist. Die verwendeten Fertigungsparametersätze, Bauplattentemperaturen und Schutzgase lassen keine Systematik erkennen und die quantitative Wirkung der Einflussgrößen ist unbekannt.

In bisherigen Untersuchungen zu geeigneten Fertigungsparametersätzen wird der Übertrag zu komplexen Geometrien nicht durchgeführt. Es werden nur einzelne Probekörper gefertigt und die Anpassung der Parametersätze für dünne Strukturen, Gitter oder Stützstrukturen wird nicht verfolgt. Eine effiziente und zielgerichtete Vorgehensweise zur Parametersatzentwicklung in Abhängigkeit von der Bauweise von Verzahnungen würde die Anwendungsmöglichkeiten des Laser-Strahlschmelzens, insbesondere für geometrisch komplexe Bauteile, erweitern.

Die Wirkung der mehr als 150 Einflussfaktoren im Laser-Strahlschmelzen und deren Wechselwirkung mit weiteren Fertigungsschritten aus der Prozesskette z. B. dem Einsatzhärten sind nur unzureichend untersucht. Durch die mangelnden Erkenntnisse ist eine Herstellung von leichtbauoptimierten Verzahnungen basierend auf wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht möglich. Ein tieferes Verständnis der Wirkungen ermöglicht die ganzheitliche Beherrschung der Prozesskette und ist notwendig für den Einsatz des Laser-Strahlschmelzens von Einsatzstählen.

Die ermittelte Zahnfußtragfähigkeit aus der Literatur von laser-strahlgeschmolzenen Verzahnungen weist starke Schwankungen von -50 % bis +10 % im Vergleich zu konventionellen Referenzverzahnungen auf. Als Ursache lassen sich ungenügende Prozessparameter, die unbekannt komplexen Abhängigkeiten der mehr als 150 Einflussgrößen und eine mangelnde Prozesskette identifizieren. Versuchsergebnisse zur Zahnflankentragfähigkeit oder der Tragfähigkeit von leichtbauoptimierten Verzahnungen aus Einsatzstahl wurden im Rahmen der Literaturrecherche nicht gefunden.

Weiterhin sind keine belastbaren Auslegungskennwerte für AM-Verzahnungen aus dem derzeitigen Stand der Technik bekannt. Anwenderinnen können sich nicht auf eine bekannte Auslegung nach Normen verlassen. Die Einordnung der erzielbaren AM-Materialqualität in gängige Normen für Verzahnungen fehlt. Es gilt beispielhaft zu prüfen, ob die geforderten Sauerstoffgehalte der MQ- und ME-Klasse in einer industrietypischen Laser-Strahlschmelzanlage eingehalten werden können. Ebenso ist zu ermitteln, ob die geforderten Eigenschaften nach dem Einsatzhärten für eine Einordnung in höhere Qualitätsklassen erzielbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine erstmalige Einteilung des AM-Materials in die Qualitätsklassen erfolgen. Hierbei sollen Festigkeitskennwerte (Zahnfuß- und Zahnflanken-tragfähigkeit) von leichtbauoptimierten AM-Verzahnungen ermittelt werden. Dadurch sollen Anwendende die Vorteile der additiven Fertigung aus dem Bereich der Antriebstechnik zur Verfügung gestellt werden. Allgemeingültige Handlungsempfehlungen zur Fertigung und Auslegung von Leichtbauverzahnungen werden in dieser Arbeit erstellt.

## 4 Werkstoff, Anlagentechnik und Zahnrad-Design

Im folgenden Abschnitt wird das verwendete Ausgangsmaterial für die weiteren Untersuchungen vorgestellt und charakteristische Eigenschaften wie Kohlenstoffgehalt und Partikelgrößenverteilung werden bestimmt. Mit Hilfe dieser Informationen ist eine Einordnung der Ergebnisse in den Stand der Technik möglich und die Nachvollziehbarkeit gegeben. In Zusammenhang mit der vorgestellten Anlagentechnik (Abschnitt 4.2) können die Ergebnisse reproduziert oder auf andere Anlagen übertragen werden.

Die verwendeten Mess- und Prüfmethode sind im Anhang in Tabelle 21 aufgeschlüsselt und wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 17296-2 und VDI 3405 Blatt 2 ausgewählt.

### 4.1 Werkstoff 16MnCr5

In den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit lag der Werkstoff 16MnCr5 als Pulver in zwei Chargen vor und diente als Ausgangsstoff für das Laser-Strahlschmelzen. Beide Chargen wurden mittels Gasverdüsung hergestellt. Die Ermittlung der Pulvereigenschaften erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO/ASTM 52907. Tabelle 2 fasst die chemische Zusammensetzung der Pulverchargen zusammen.

*Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Pulverchargen gemessen mittels ICP-OES und Trägerheißgasextraktion (CS)*

Legierungselement	Einheit	C	Mn	Cr	Si	P	S	Fe
Grenzwerte nach DIN EN 683-3	Ma.-%	0,14-0,19	1,0-1,3	0,8-1,1	≤0,4	≤0,025	≤0,035	Rest
Charge 1	Ma.-%	0,15	1,05	0,9	0,19	-	-	Rest
Charge 2	Ma.-%	0,17	1,37	1,13	0,31	-	-	Rest

Ein Vergleich der chemischen Zusammensetzung der Chargen mit den Grenzwerten nach DIN EN 683-3 zeigt, dass Charge 1 alle Anforderungen erfüllt. In Charge 2 ist ein erhöhter Mn- und Cr-Gehalt festzustellen, welcher über den Grenzwerten liegt. Untersuchungen von KAMPS zur Prozesskette zeigten eine Verflüchtigung

der Legierungselementgehalte von Pulver zu Bauteil (KAMPS 2018). Da die Überschreitung der Legierungselementgehalte von 2,5 bzw. 5 % als klein anzusehen ist und nach den Untersuchungen von KAMPS eine Reduktion von Pulver zu Endbauteil zu erwarten ist, wird Charge 2 trotz der Abweichungen genutzt. Eine Messung der chemischen Zusammensetzung der erzeugten Bauteile und Proben wird in Abschnitt 5.7 vorgestellt und diskutiert. Da der Mn- und der Cr-Gehalt die Härtebarkeit und Martensitbildung beeinflussen, wird dies in den Untersuchungen dokumentiert um Rückschlüsse über die Effektstärke zu gewinnen (BARGEL & SCHULZE 2018). Eine Messung der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Pulverwerkstoffe im Laser-Strahlschmelzen ist zur Qualitätssicherung und Interpretation der Ergebnisse unerlässlich.

Die Berechnung des Kohlenstoffäquivalents ( $C_{eq}$ ) ergibt einen Wert von 0,5 % für Charge 1 und einen Wert von 0,62 % für Charge 2. Insbesondere der erhöhte Kohlenstoffgehalt von Charge 2 hat bei der Berechnung des  $C_{eq}$  großen Einfluss. Beide Chargen liegen mit ihren  $C_{eq}$  in dem Bereich, der eine reduzierte Schweißbarkeit aufweist.

Bei der Betrachtung der Partikelgrößenverteilung zeigt sich, dass Charge 2 im Durchschnitt aus Partikeln geringeren Durchmessers besteht. Dies ist besonders am D50-Durchmesser zu sehen, der in Charge 2 ca. 10  $\mu\text{m}$  geringer ist als in Charge 1 (vgl. Tabelle 3). Die Partikelgrößenverteilung beider Chargen liegen in üblichen Verteilungen für das Laser-Strahlschmelzen vor (VOCK ET AL. 2019).

*Tabelle 3: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Pulverchargen*

Partikelgrößenverteilung	Einheit	D10	D50	D90
Charge 1	$\mu\text{m}$	28,4	42,4	58,7
Charge 2	$\mu\text{m}$	22,4	33,9	50,6

Die Betrachtung der Partikelform verdeutlicht, dass vornehmlich sphärische Partikel mit vereinzelt länglich verformten Partikeln vorliegen (siehe Abbildung 22). Diese Anteile sind jedoch gering. Ebenso zeigen Schliffe der Pulverpartikel die Abwesenheit von innerer Porosität. Das vorliegende Gefüge nach der Verdüsung kann als martensitisch-bainitisch mit geringen Anteilen von Ferrit bestimmt werden; dies stimmt mit der schnellen Abkühlung im Verdüsungprozess überein.

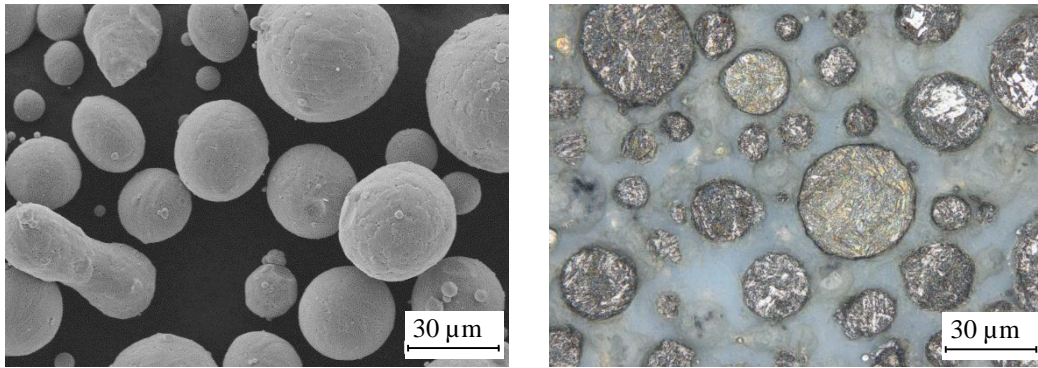


Abbildung 22: Pulverform (links) und Pulverschliff (rechts) von Charge 2

Die sphärischen Pulverpartikel ohne Poren im Inneren bieten gute Voraussetzungen für die Verarbeitung im Laser-Strahlschmelzen (SLOTWINSKI ET AL. 2014). Zusätzlich lassen sich mit sphärischen Partikeln eine hohe Packungsdichte und eine gute Fließfähigkeit ohne interpartikuläres Verschränken erzielen (YANG & EVANS 2007). Die getroffenen Annahmen werden durch die Ergebnisse der Fließfähigkeitsmessung, dargestellt in Abbildung 23, bestätigt.

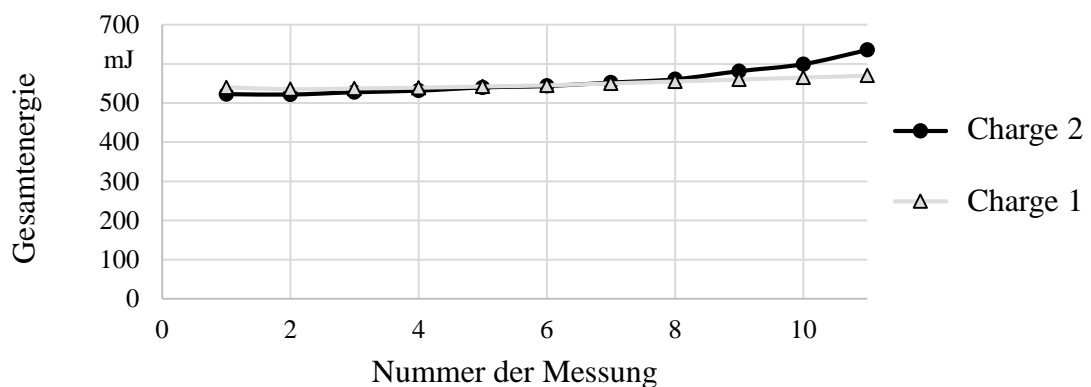


Abbildung 23: Vergleich der Fließfähigkeit

Beide vorliegenden Pulverchargen besitzen nahezu identische Fließfähigkeiten und Eigenschaften, die einem durchschnittlichen Maß für Stahl-Pulverwerkstoffe im Laser-Strahlschmelzen entsprechen.

Beide Pulverwerkstoffe (Charge 1 und Charge 2) verfügen über geeignete Eigenschaften (Pulverform, Partikelgrößenverteilung und Fließfähigkeit) für das Laser-Strahlschmelzen und lassen ein gutes Aufziehen des Pulvers in der Anlage sowie anschließend die einwandfreie Verarbeitung erwarten.



### 4.2 Verwendete Anlagentechnik

In Abbildung 24 wird die verwendete Anlage EOS M290 mit den wichtigsten Maschinensystemen gezeigt.

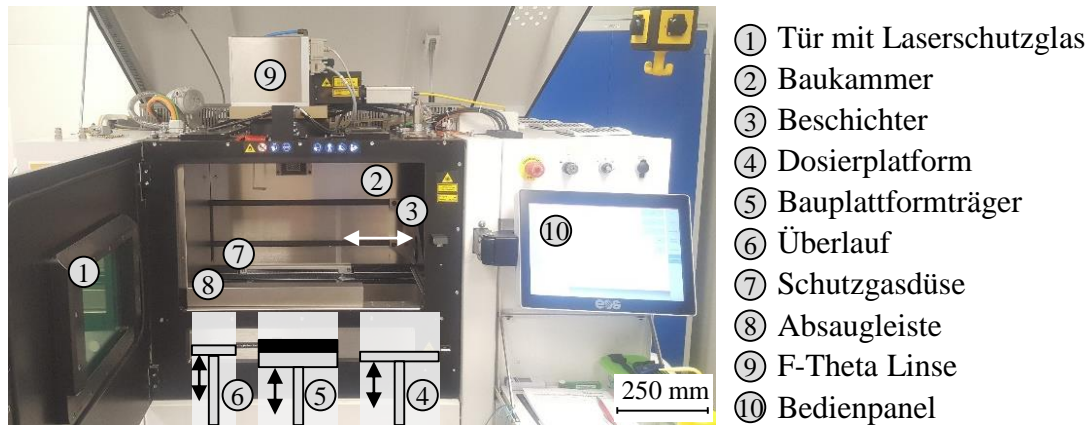


Abbildung 24: Verwendete Laser-Strahlschmelzanlage EOS M290

Es ist ein Ytterbium-Faserlaser mit einer maximalen Nennleistung von 400 W und einer Wellenlänge von 1060–1100 nm verbaut. Der Fokussdurchmesser beträgt 73  $\mu\text{m}$  und liegt in einer Gaußverteilung vor. Hierzu sei auf die Vermessung der Strahlcharakteristik im Anhang (Abbildung 93) verwiesen. Die Scangeschwindigkeit ist auf 7000 mm/s limitiert. Der nutzbare Bauraum hat ein Volumen von 250 x 250 x 325 mm<sup>3</sup> (Breite x Länge x Höhe). Über den Beschichter (3), die Dosierplattform (4) und den Bauplattformträger (5) lässt sich eine Pulverschicht mit einer minimalen nominellen Schichtstärke von 20  $\mu\text{m}$  einstellen. Die Bauplatte kann auf bis zu 200 °C vorgeheizt werden und ein Restsauerstoffgehalt von unter 0,1 Volumenprozent (Vol.-%) wird durch das Umluftsystem eingestellt. Als Beschichtungsmedium wird eine Carbonbürste eingesetzt. Alle Elemente der Systemtechnik entsprechen dem Auslieferungszustand durch den Hersteller.

Für die Versuche mit erhöhter Bauplattentemperatur von 400 und 600 °C wird eine AconityOne-Anlage der Aconity3D GmbH verwendet. Für Details zu dieser Anlagentechnik sei auf die Literatur verwiesen (MÜLLER ET AL. 2019). Die Multimaterialbauweise mit In-situ-Legieren wird auf einer umgebauten SLM250-Anlage der SLM Solutions AG umgesetzt. Für eine detaillierte Beschreibung der Anlage und des verwendeten Multimaterial-Mechanismus sei auf die Dissertation von ANSTÄTT verwiesen (ANSTÄTT 2020).

Die Wärmebehandlung der Proben der Vorversuche wird mittels des Glüh- und Härteofens N31 der Nabertherm GmbH durchgeführt. Es wird eine gleichmäßige Temperaturverteilung nach DIN 17052-1 in der Ofenkammer mit Temperaturabweichungen von 10 K bei einer maximalen Temperatur von 1280 °C erzielt. Die Steuerung erfolgt über eine Siemens SPS mit einstellbaren Warte- und Heizzeiten. Die gefertigten Verzahnungen und Proben zur Ermittlung mechanischer Kennwerte werden in industriellen Öfen im Gasaufkohlen durch die Härterei Wittmann einsatzgehärtet (Direkthärtung).

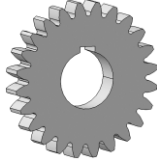

Die Bearbeitung der Verzahnungen, wie Abdrehen des Supports, Flach- und Bohrungsschleifen und das Verzahnungsschleifen, erfolgt bei der Wittmann Zahnradfabrik in einem industriellen Maßstab nach gängigen Qualitätsanforderungen einer Lohnbearbeitung.

### **4.3 Auslegung und Design der Leichtbauverzahnungen**

Im Rahmen der Arbeit werden zwei verschiedene Geometrien von Verzahnungen genutzt um einerseits die Zahnfußtragfähigkeit zu ermitteln und andererseits die Gestaltfestigkeit und Zahnflankentragfähigkeit zu bestimmen.

Die Verzahnungsgeometrie zur Ermittlung der Zahnfußtragfähigkeit ist eine standardisierte Prüfverzahnung für die Pulsatorprüfung und wird daher im folgenden auch Pulsatorrad genannt. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit der erzeugten Versuchsdaten mit existierenden Forschungsergebnissen und Normkennwerten. Die Gestaltfestigkeit und die Zahnflankentragfähigkeit werden an einer praxisnahen automobiltypischen Schrägverzahnung ermittelt, die im weiteren Verlauf der Arbeit als Typ-1 bezeichnet wird. Mit den vorhandenen Verzahnungsdaten kann die Tragfähigkeit nach Norm berechnet werden. Die Daten beider Verzahnungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Table 4: Verzahnungsdaten der Prüfverzahnungen (Ritzel/Rad)

Beschreibung	Symbol	Einheit	Pulsatorrad	Typ-1
Abbildung				
Modul	$m_n$	mm	5	3,3
Zähnezahl	$z$	—	24	25/27
Zahnbreite	$b$	mm	20	14/16
Kopfkreis- durchmesser	$d$	mm	133,6	94/101
Fußkreis- durchmesser	$D_F$	mm	110,06	79,57/86,57
Eingriffswinkel	$\alpha$	°	20,0	19,0
Schrägungs- winkel	$\beta$	°	0	18,0
Gewicht	$m$	kg	1,54	0,86/0,99

Unter Nutzung der Designfreiheiten des Laser-Strahlschmelzens wurden jeweils Leichtbauvarianten der Verzahnungen entwickelt. Dabei wurde das Prüfrad leichtbauoptimiert, während das Ritzel der Typ-1-Verzahnung zur Kraftübertragung im Laufversuch nicht optimiert wurde. Die Leichtbaustrukturen wurden im Bereich zwischen Nabe und Zahnkranz eingebracht und anschließend rechnergestützt für den Lastfall von 3000 Umdrehungen pro Minute und ein Drehmoment von 250 Nm ausgelegt. Für die Einbringung und Gestaltung der Leichtbaustruktur wurde zuerst ein sogenannter Designraum bestimmt, der den Entwurfsraum für die Gewichtsoptimierung darstellt. Ziel ist es, den Zahnfuß nicht zu schwächen und die Kraftübertragung über die Passfeder weiterhin zu gewährleisten (siehe Abbildung 25). Zur Bestimmung der äußeren Grenze des Designraums wurde eine Bewertung der Zahnkranzdicke ( $s_R$ ) nach ISO 6336-3 durchgeführt. Eine Verringerung der Zahnkranzdicke führt zu einem Anstieg des Zahnkranzdickenfaktors ( $Y_B$ ), der die Stützwirkung der Zahnkranzdicke beschreibt und antiproportional zur Sicherheit  $S_F$  im Zahnfuß ist (siehe Abbildung 25 Teil b). Für eine Sicherheit von 1,0 kann damit eine zulässige Zahnkranzdicke von 5,2 mm ermittelt werden.

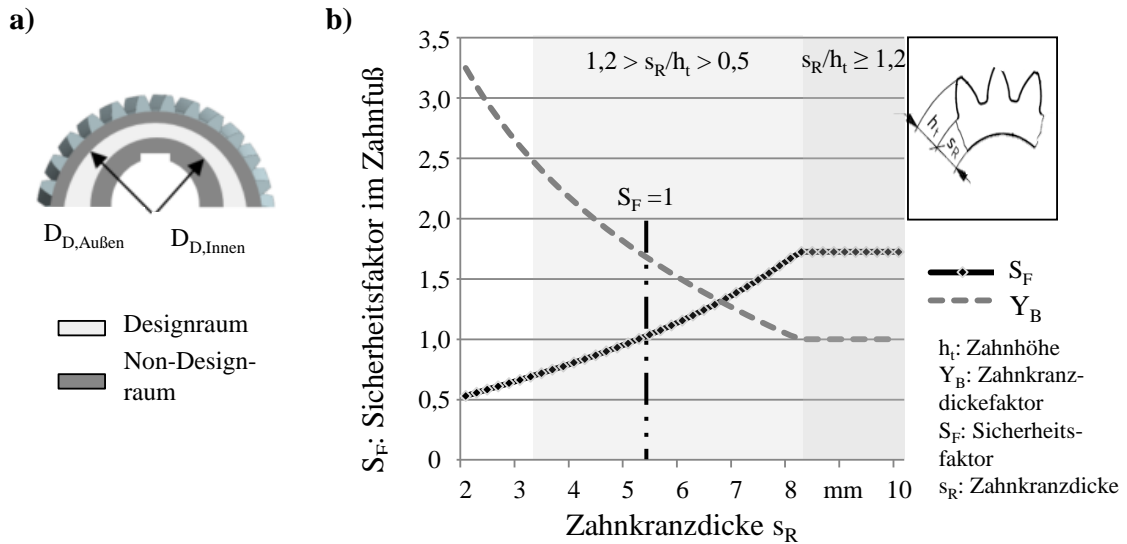


Abbildung 25: a) Designraum für die Leichtbaustruktur nach JANSEN 2018  
 b) Ermittlung der Zahnkranzdicke nach ISO 6336-3

Für die innere Grenze des Designraums wurden Untersuchungen von BRŮŽEK UND LEIDICH verwendet, die die minimale Wanddicke oberhalb der Passfedern untersucht haben (BRUZEK & LEIDICH 2007). Daraus ergibt sich eine untere Grenze von 5,94 mm, die ca. der zweifachen Passfederhöhe entspricht.

Basierend auf dem abgeleiteten Designraum wurden Leichtbauverzahnungen entwickelt. Das detaillierte Vorgehen, die Simulationsumgebung und die Ergebnisse sind in SCHMITT ET AL. 2019a dargelegt. Es wurden die Ansätze der bionischen Leichtbauoptimierung nach KAMPS ET AL. und die rechnergestützte Topologieoptimierung eingesetzt (KAMPS ET AL. 2017, BENDSØE & SIGMUND 2004). Im Bereich der bionischen Optimierung wurden unter anderem Analogien der Bienenwabe, des Winterschachtelhalms und der Binse bewertet. In der Topologieoptimierung wurde die Anzahl der Symmetrieebenen von 27 (eine pro Zahn) auf 6 variiert. Anschließend erfolgte in allen Fällen eine rechnergestützte FEM-Analyse (FEM: Finite Elemente Methode) der Strukturen mittels Siemens NX. Basierend auf diesen Ergebnissen wird eine Anpassung der Verrundungen vorgenommen, so dass eine Sicherheit von 1,0 nicht unterschritten wird. Notwendige Materialkennwerte dazu wurden von KAMPS abgeleitet (KAMPS 2018). Es ergeben sich damit für die Typ-1-Verzahnung drei Leichtbauvarianten mit einer Masseinsparung von 30 bis 44 %, wie in Abbildung 26 dargestellt ist.

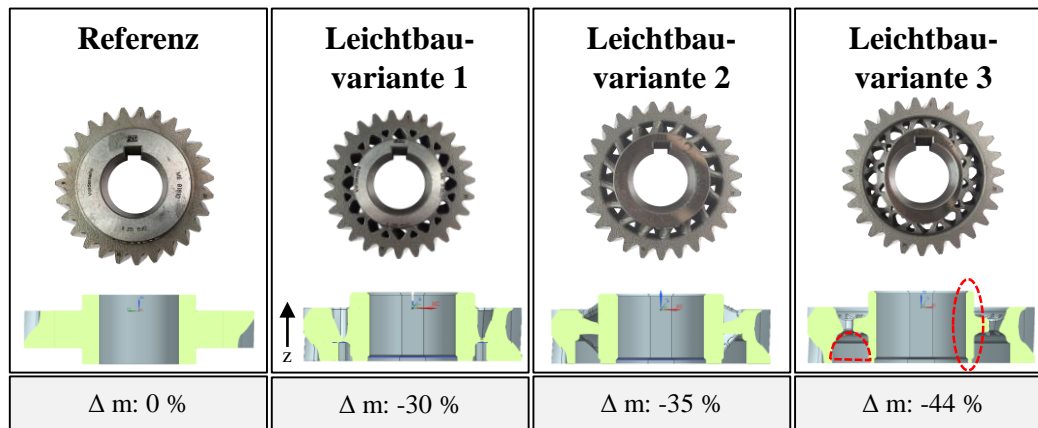


Abbildung 26: Leichtbauvarianten der Typ-1-Verzahnung

Leichtbauvariante 2 basiert auf einer Topologieoptimierung und zeigt ein Streben-Design mit 16 radial angeordneten Streben zwischen Zahnkranz und Nabe (BIHLMER 2018). Die Leichtbauvarianten 1 und 3 wurden mittels Bionik entwickelt und folgen dem Prinzip der Binse, die aus regelmäßigen Zug- und Druckdreiecken besteht. In Leichtbauvariante 3 ist die Masseinsparung durch die Nutzung einer an den Kraftfluss angepassten Nabe und einer Abrundung der Struktur im Zahnkranz weiter erhöht. Beide Konstruktionsmerkmale sind in Abbildung 26 markiert. Die Massereduktion im Pulsatorrad (nicht dargestellt) wurde ebenfalls durch Abstraktion der Binse entwickelt und weist eine Masseinsparung von 30 % auf. Die Konstruktionsmethodik und der Leichtbaugrad ist damit vergleichbar zur dargestellten Leichtbauvariante 1 der Typ-1-Verzahnung.

## 5 Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

In diesem Kapitel wird das Vorgehen zur Entwicklung von bauweisenspezifischen Parametersätzen für das Laser-Strahlschmelzen von Zahnrädern betrachtet. Dazu werden geometrische Merkmale extrahiert sowie Methoden entwickelt und experimentell durchgeführt, um die Merkmale erfolgreich im Laser-Strahlschmelzen fertigen zu können. Als Ergebnis steht dem Anwender ein bauweisen- und anwendungsspezifischer Parametersatz zur Verfügung. Das Vorgehen innerhalb des Kapitels wird in Abbildung 27 zusammengefasst.

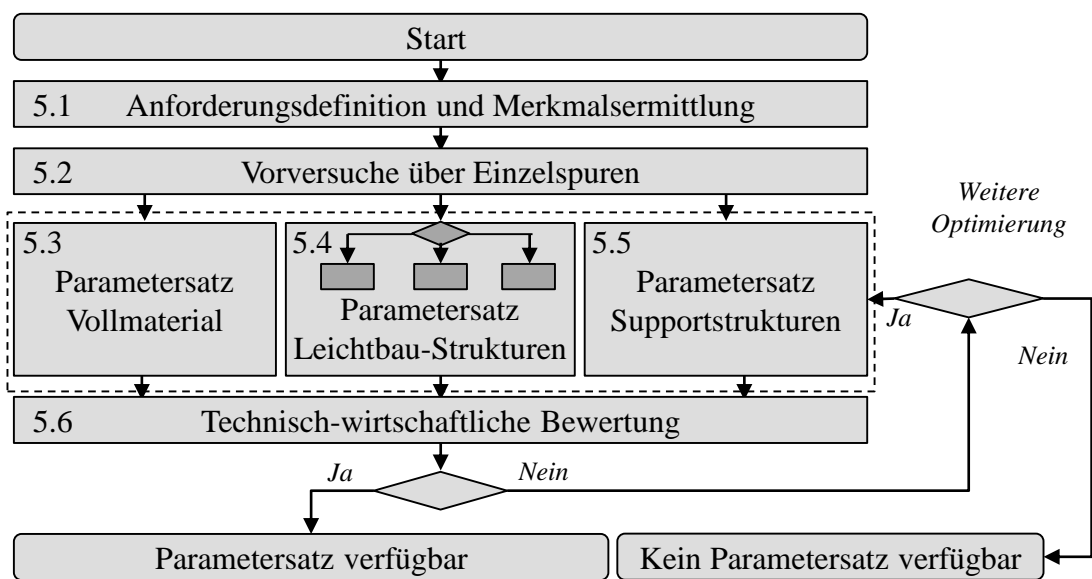


Abbildung 27: Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisenspezifischen Parametersatzes

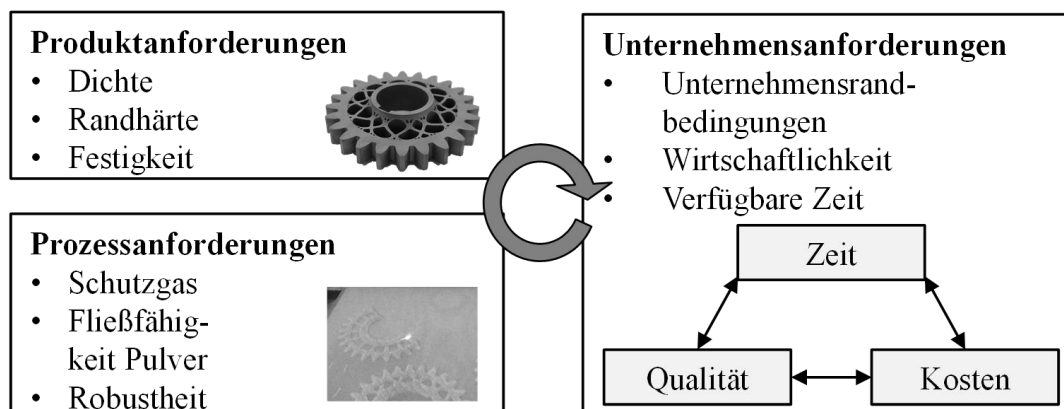
Im ersten Schritt werden Anforderungen an das Material aus der Anwendung hergeleitet. Diese können nach dem Prinzip der ‚Koevolution‘ durch einen Rückschluss angepasst werden, falls in der Nichterfüllung ein Erkenntnisgewinn erfolgt, der zu einer Neubewertung und Konkretisierung führt (SONG ET AL. 2019). Anschließend wird das Bauteil durch *Reverse Engineering* in geometrische Merkmale eingeteilt, um die Notwendigkeit der gezielten Parametersatzentwicklung für geometrisch komplexe Leichtbaustrukturen zu berücksichtigen. Basierend auf den Erkenntnissen wird ein bauweisenspezifischer Parametersatz entwickelt. Grundlage der Parametersatzentwicklung sind die Erkenntnisse aus Einzelspuren. Anschließend kann ein Parametersatz für Vollmaterial, Leichtbaustrukturen oder Supportstrukturen entwickelt werden. Durch die Erarbeitung von Parametersätzen für Leichtbau- und Supportstrukturen wird die 4-Platten-Methode von KAMPS sys-

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

tematisch erweitert (KAMPS 2018). Auf Basis der Ergebnisse erfolgt eine technisch-wirtschaftliche Bewertung anhand des Anforderungsprofils durch einen paarweisen Vergleich (LINDEMANN 2009). Abhängig davon ist entweder der Zielzustand erreicht, die Anforderungen können durch Erkenntnisse konkretisiert werden („Koevolution“) bzw. der Lösungsraum der Experimente kann erweitert werden oder es erfolgt ein Abbruch. Abschließend wird die erzielte Materialqualität des Werkstoffs 16MnCr5 nach Abschluss des Vorgehens mit den Anforderungen der Materialklassen ML, MQ und ME für Verzahnungen nach ISO 6336-5 verglichen und es wird eine Bewertung durchgeführt.

### 5.1 Anforderungsdefinition und Merkmalermittlung

Zu Beginn der Entwicklungstätigkeiten wird eine Anforderungsliste aufgestellt mit dem Ziel, eine strukturierte sowie priorisierte Dokumentation der Anforderungen zu erhalten (LINDEMANN 2009). Diese können in die Kategorien Produkt-, Prozess- und Unternehmensanforderung eingeteilt werden (FELDHUSEN & GROTE 2013). Das Zusammenspiel der Bereiche ist in Abbildung 28 dargestellt. Die so abgeleiteten Anforderungen dienen als Zielgrößen, um die Ergebnisse der Parametersatzentwicklung quantifizieren und bewerten zu können.



Eine detaillierte Anforderungs-Checkliste am Beispiel von Zahnrädern ist dem Anhang in Abbildung 94 zu entnehmen

Abbildung 28: Definition und Zusammenspiel der Anforderungen

**Quantitative Produktanforderungen** werden an die erzielte Materialqualität gestellt. Vornehmlich wird eine geringe Restporosität unter 0,5 % nach VDI 3405 Blatt 2 angestrebt. Anwendungsspezifisch kann davon allerdings abgewichen werden. Weitere Anforderungen können z. B. Rissfreiheit, Härte, Gefüge, chemische Zusammensetzung oder Zugfestigkeit sein. Durch diese werden die Zielerrei-

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

chungskriterien für die Parametersatzentwicklung gesetzt. Nach ISO 6336-3, NIEMANN & WINTER 2003, VDI 3405 Blatt 2 lassen sich die vorläufigen Anforderungen an den Parametersatz und die erzielte Werkstoffqualität für Verzahnungen nach dem Laser-Strahlschmelzen wie folgt zusammenfassen:

- Minimale Bauteildichte: 99,5 %
- Oberflächengüte:  $R_a < 20 \mu\text{m}$
- Aufbaurrate: möglichst hoch
- Gefüge: gleichmäßig und feinkörnig

Darüber hinaus können weitere **qualitative Anforderungen** wie verfügbare Anlagentechnik oder die Einhaltung von unternehmensspezifischen Qualitätsstandards (z. B. Zugänglichkeit für die Sichtprüfung) gegeben sein.

Im nächsten Schritt ist die Betrachtung und die Analyse der Bauteilgeometrie notwendig. Ziel ist es, spezifische auf die Bauweise abgestimmte Parametersätze zu entwickeln. Die Gesamtgeometrie des Bauteils wird dazu in einzelne Merkmale zerlegt und die Häufigkeit klassifiziert. Dies kann einerseits ingenieurgetrieben über einen Reverse-Engineering-Ansatz durch die gedankliche Zerlegung des Bauteils in Einzelgeometrien erfolgen (LINDEMANN 2009). Andererseits kann eine softwaregestützte Zerlegung über merkmalerkennende Algorithmen oder durch Dekomposition der Bauteilgeometrie in bekannte Merkmale und Größeneinteilung erfolgen (LEIRMO & MARTINSEN 2020, JIANG ET AL. 2011). Eine beispielhafte Zerlegung und Klassifizierung der Geometriemerkmale ist in Abbildung 29 zu sehen.

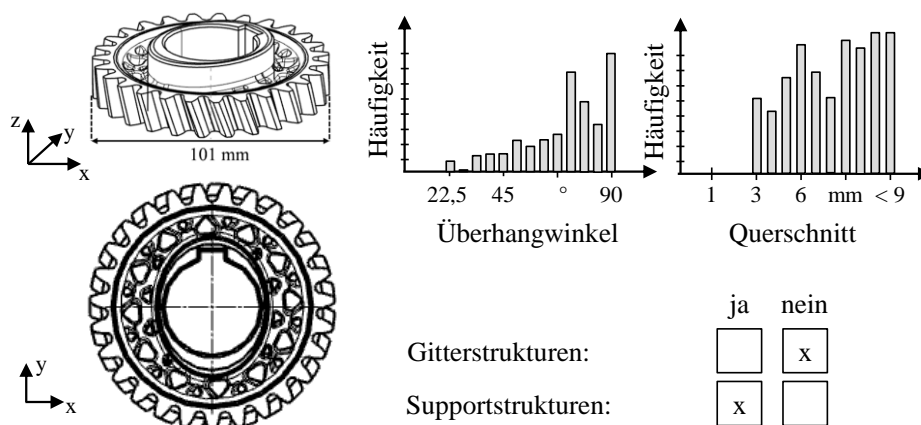


Abbildung 29: Zerlegung eines Leichtbauzahnrad in Geometriemerkmale durch Reverse-Engineering-Ansatz



## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

---

Die Zerlegung erfordert von Anwenderinnen ein Grundverständnis des Laser-Strahlschmelzens, z. B. zur Bewertung, ob Supportstrukturen notwendig sind. Hierzu können allgemeine Designempfehlungen herangezogen werden, die in der Literatur zu finden sind (KRANZ ET AL. 2015, ADAM & ZIMMER 2014, ADAM & ZIMMER 2015). Aufbauend auf den klassifizierten Merkmalen können die Anforderungen an den zu entwickelnden Parametersatz und die Prüfgeometrien zur Quantifizierung der Zielerreichung abgeleitet werden. Am Beispiel des Leichtbauzahnrad ergibt sich die Notwendigkeit, Parametersätze für Supportstrukturen und einen Parametersatz für Vollmaterial mit geringen Überhangswinkeln zu entwickeln. Angepasste Parametersätze für Gitterstrukturen sind dagegen nicht notwendig. Mit Hilfe dieser Informationen kann eine zielgerichtete Parametersatzentwicklung erfolgen, um die Fertigung der Leichtbauverzahnung möglichst schnell (zeitlich) und mit geringem Aufwand (ökonomisch) zu ermöglichen. Gleichzeitig ist der Lösungsraum für den Anwender bereits eingeschränkt, woraus eine vereinfachte Versuchsplanung resultiert.

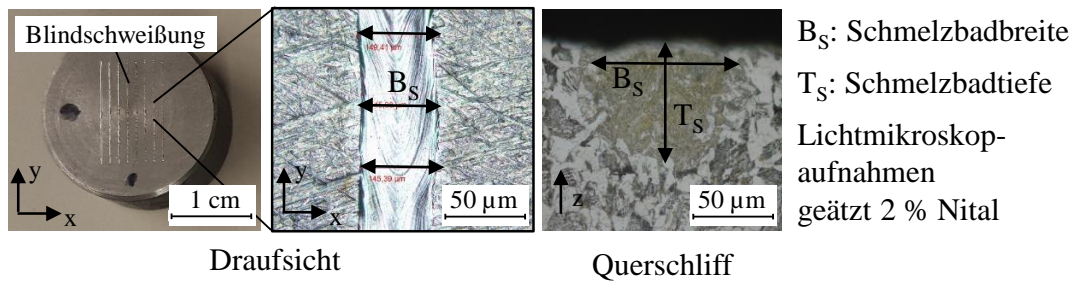
## 5.2 Vorversuche durch Einzelspurexperimente

Ziel des Vorversuchs ist es, das Parameterfenster effektiv und ohne hohen Analyseaufwand einzugrenzen. Diese **orientierenden Versuche** ermöglichen es, den Lösungsraum in einer frühen Phase einzuschränken (LINDEMANN 2009). Dazu bietet sich die Fertigung von Einzelspuren an, da die hier auftretenden Eigenschaften eine gute Korrelation mit späteren Volumenkörpern besitzen (DILIP ET AL. 2017). Insbesondere können Inhomogenitäten wie das Auftreten von Balling oder der Übergang zum Tiefschweißen mit möglicher Wurzelporosität erkannt werden (YADROITSEV & SMUROV 2010, ABOULKHAIR ET AL. 2016). Die Einzelspuren können direkt in eine Substratplatte des gleichen Werkstoffs oder in eine einzelne Pulverschicht gefertigt werden. Beide Vorgehen sind zulässig und liefern gute Übereinstimmungen (ABOULKHAIR ET AL. 2016, VRANCKEN ET AL. 2018).

In den Vorversuchen zum 16MnCr5 wurden die Einzelspuren direkt auf eine Substratplatte aufgebracht. Das Vorgehen und die Bewertungskriterien der Einzelspuren sind in Abbildung 30 dargestellt. Die Laserleistung wurde im Bereich von 200–370 Watt und die Scangeschwindigkeit im Bereich von 500–1500  $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$  stark variiert. Durch eine Ätzung der Querschleife konnten die Schmelzbadbreite und -tiefe

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

exakt bestimmt werden, da sich das entstehende martensitisch-bainitische Gefüge deutlich von dem perlitisch-ferritischen Gefüge des Grundmaterials absetzt.



**Variierte Steuergrößen:** Laserleistung  $P_L$  und Scangeschwindigkeit  $v_s$   
**Bewertungskriterien:** Homogenität des Schmelzbad, Schmelzbadbreite und -tiefe

Abbildung 30: Orientierende Versuche zur Schmelzbadstabilität

Die Auswertung der Schmelzbäder zeigt, dass beim Werkstoff 16MnCr5 vornehmlich ein Wärmeleitschweißen vorliegt. Der Übergang zum Tiefschweißen findet erst bei sehr hohen Streckenenergien über  $0,6 \frac{J}{mm}$  statt. Dies ist unter anderem mit der hohen Wärmeleitfähigkeit von  $44 \frac{W}{mK}$  im Vergleich zu  $15 \frac{W}{mK}$  beim Werkstoff 1.4404 zu begründen. Durch das niedrige Verhältnis der Schmelzbadbreite und -tiefe ( $B_s/T_s > 0,5$ ; siehe Punkt 2 in Abbildung 31) ist die Wahrscheinlichkeit für Heißrisse reduziert (SCHULZE 2010).

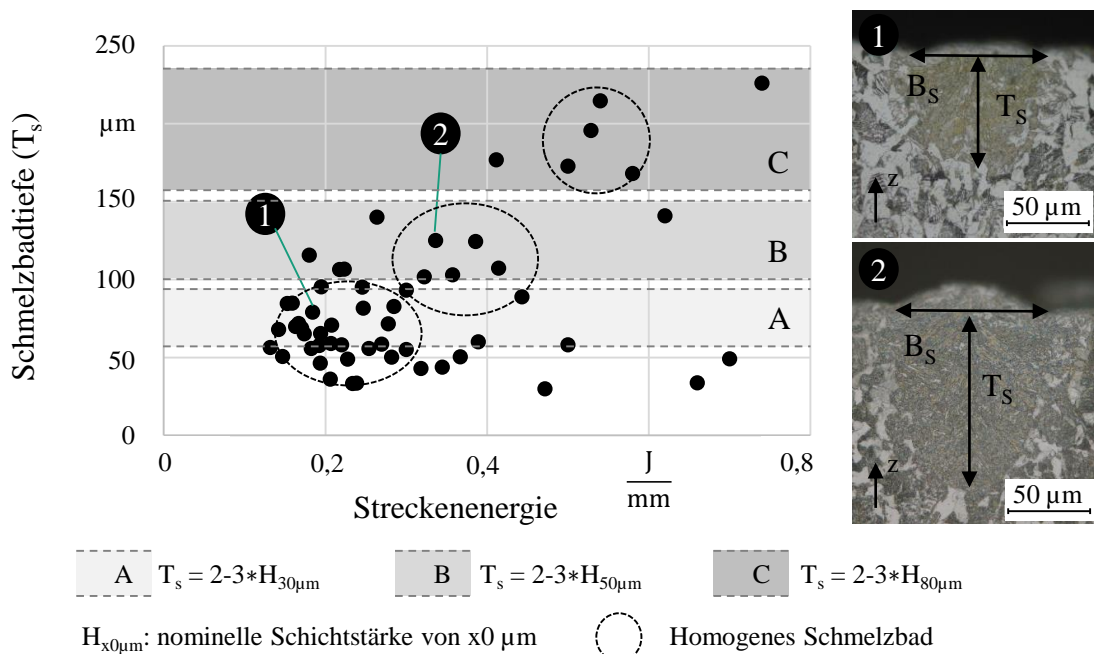


Abbildung 31: Resultierende Schmelzbadtiefe und Einteilung in Schichtstärken

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

---

Insgesamt lässt sich eine lineare Zunahme der Schweißbadtiefen bei steigender Streckenenergie beobachten (vgl. Abbildung 28). Die resultierenden Schmelzbadtiefen reichen dabei von 29,8–214,7  $\mu\text{m}$ . Daraus ergibt sich die Möglichkeit, verschiedene Schichtstärken für den Vollmaterialparametersatz zu verwenden. Nach KRAUSS soll die Schmelzbadtiefe ein Mehrfaches der nominellen Schichtstärke besitzen, da ansonsten mit Bindefehlern zwischen den Schichten zu rechnen ist (KRAUSS 2016). Selbiges bestätigen Untersuchungen von NARRA für die Werkstoffe In718, Ti6Al4V und AlSi10Mg (NARRA 2017). Die Verwendung hoher Schichtstärken verspricht dabei eine erhöhte Wirtschaftlichkeit. Allerdings steigt mit der Verwendung hoher Energieeinträge die Anzahl der auftretenden Prozessnebenprodukte wie Spratzer, die die erzielbare Materialqualität beeinflussen können (GUNENTHIRAM ET AL. 2018). Geringe Schichtstärken erlauben dagegen durch schmalere Schmelzbäder und geringeren Energieeintrag eine verbesserte Kontrolle der Oberflächenrauigkeit, unter anderem durch einen geringeren Treppenstufenefekt (GEBHARDT 2016). Zusätzlich kommt es durch den verringerten Energieeintrag und flachere Schmelzbäder an den Bauteilrändern zu weniger Pulveranhaftungen. Über die ermittelte Schmelzbadtiefe können nun geeignete Schichtstärken für einen Vollmaterial-Parametersatz festgelegt werden. Mit der zusätzlichen Information über die Schmelzbadhomogenität kann eine Vorauswahl des Parametersatzes getroffen werden. Für das Anwendungsbeispiel des Leichtbauzahnrad werden vorerst drei Schichtstärken von 30, 50 und 80  $\mu\text{m}$  verfolgt. Damit kann eine Abstufung hinsichtlich der Oberflächenqualität und der Produktivität erfolgen. Zusätzlich fließen die Erkenntnisse über die Einschweißtiefe in die Entwicklung von bauweisenspezifischen Parametersätzen für Leichtbaustrukturen (z. B. Gitter oder dünne Wände), die in Abschnitt 5.4 beschrieben wird.

### 5.3 Vorgehen zur Ermittlung eines Parametersatzes für Vollmaterial

Im nächsten Schritt werden Volumenkörper (Würfel  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ) mit den gewählten Parametersätzen aus den Vorversuchen aufgebaut. Basierend auf den Vorversuchen (Homogenität und Einschweißtiefe) ergeben sich für die ausgewählten Schichtstärken die in Tabelle 5 dargestellten Variationen für den Werkstoff 16MnCr5. Diese wurden um Werte für den Spurabstand ergänzt, die sich an MEINERS orientieren (KAMPS 2018, MEINERS 1999). Der Spurabstand wurde dabei im Bereich einer halben Schmelzbadbreite ( $B_s$ ) variiert, um einen ausreichenden Überlapp zu erreichen (ABOULKHAIR ET AL. 2016). Daraus ergibt sich über alle Parametervariationen eine Energiedichte zwischen 32,7 und 120,4  $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ . Basierend

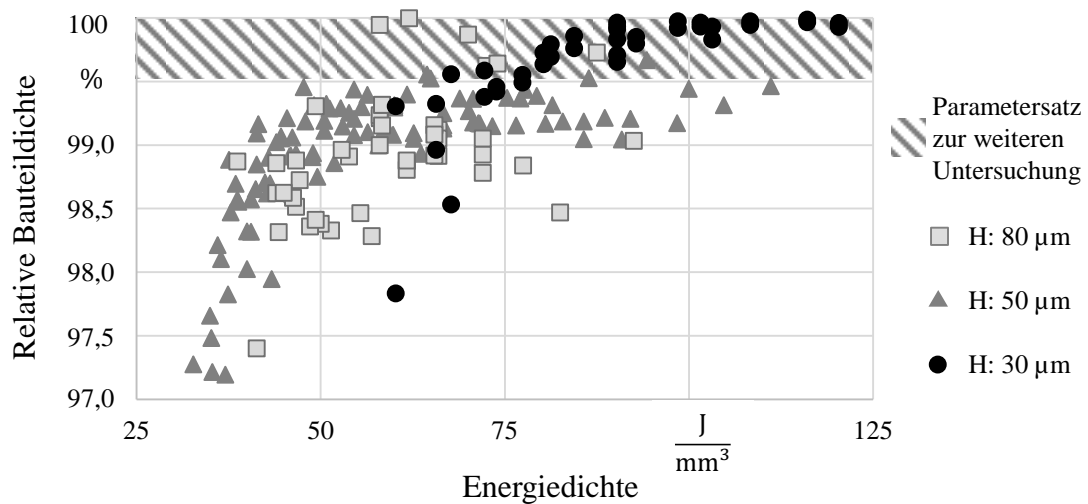
## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

auf bekannten Parametersätzen für Stähle wurde eine Streifenbelichtung mit 6 mm Scanvectorlänge als Scanstrategie ausgewählt (OVER 2003).

*Tabelle 5: Parametervariationen für drei ausgewählte Schichtstärken*

Schichtstärke (H in $\mu\text{m}$ )	Laserleistung ( $P_L$ in W)	Scangeschwindigkeit ( $v_s$ in mm/s)	Spurabstand (h in mm)
30	200	900–1200	0,06–0,09
50	250–350	700–1500	0,09–0,11
80	290–370	500–1200	0,10–0,13

In allen Versuchen wurden eine Bauplattentemperatur von 80 °C und Argon als Schutzgas eingesetzt. Die Dichtemessung wurde mittels Archimedischem Prinzip unter Verwendung von Isopropanol durchgeführt. Jeder Parametersatz wurde dreimal zufällig verteilt auf der Bauplatte gefertigt. Die Streuung der relativen Bauteildichte der drei Proben pro Parametersatz lag bei maximal 0,5 %. Der Mittelwert der relative Dichte der Volumenkörper ist in Abbildung 32 ohne Streubalken dargestellt.



**Variierte Steuergrößen:** Laserleistung  $P_L$ , Scangeschwindigkeit  $v_s$ , Spurabstand h  
**Bewertungskriterien:** Relative Bauteildichte

*Abbildung 32: Ergebnis der relativen Bauteildichte (Mittelwert pro Parametersatz) der Volumenkörper in Abhängigkeit von der Schichtstärke*

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

Es zeigt sich, dass für alle drei Schichtstärken relative Bauteildichten über 99,5 % erzielt werden können. Die Anzahl der Parametersätze, die eine relative Bauteildichte von mehr als 99,5 % erzielen, ist bei einer 30 µm Schichtstärke am höchsten. Dies spricht für ein großes Parameterfenster im Vergleich zu den höheren Schichtstärken. Die Prozessbeobachtung zeigt erwartungsgemäß eine Zunahme der Prozessnebenprodukte und Spratzerbildung mit steigender Schichtstärke auf Grund des höheren Energieeintrags. Allen drei Schichtstärken ist eine starke Reduktion der relativen Dichte gemeinsam, sobald eine spezifische Energiedichte unterschritten wird. Diese liegt bei einer 30 µm Schichtstärke bei ca.  $70 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ , bei einer 50 µm Schichtstärke bei ca.  $60 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  und einer 80 µm Schichtstärke bei ca.  $50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$ . Ab diesen Grenzwerten ist der Energieeintrag zum vollständigen Aufschmelzen der übereinanderliegenden Schichten zu gering.

Zur weiteren Auswertung wurden jeweils fünf Parametersätze mit den höchsten relativen Dichten ausgewählt und in einem zweiten Fertigungsdurchgang produziert. Zusätzlich wurden darauf basierende Abstufungen von  $\pm 10\%$  gefertigt, um eine Feinabstimmung zu erreichen. Für weiterführende Details zum zweiten Fertigungsdurchgang wird auf SCHMITT ET AL. 2018 und SCHMITT ET AL. 2021c verwiesen. Auf der Grundlage dieser Fertigungsversuche wurde der Parametersatz mit der höchsten relativen Dichte und der niedrigsten Varianz der relativen Dichten über die durchgeführten Versuche in Schlifffildern mikroskopisch untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 dargestellt.

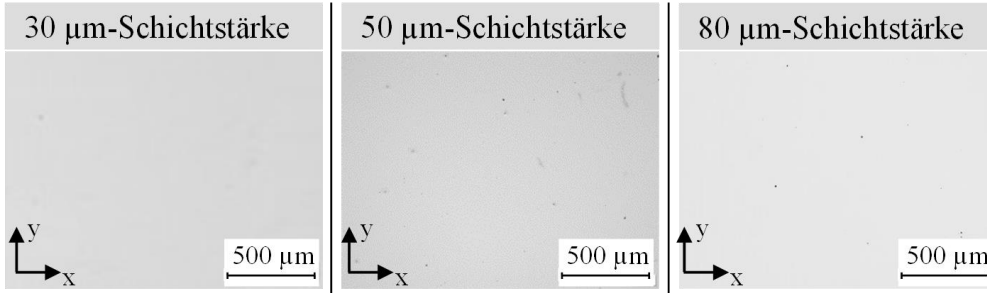
Schlifffeld	30 µm-Schichtstärke	50 µm-Schichtstärke	80 µm-Schichtstärke
			
$\rho_{\text{rel}}$	99,96 %	99,87 %	99,93 %
$E_v$	$86,58 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	$64,44 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$	$52,9 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$
$P_L$	200 W	290 W	370 W
$v_s$	$1100 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$900 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$700 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
$h$	0,07 mm	0,1 mm	0,125 mm
$v_{\text{th}}$	$2,31 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$	$4,5 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$	$7,0 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$

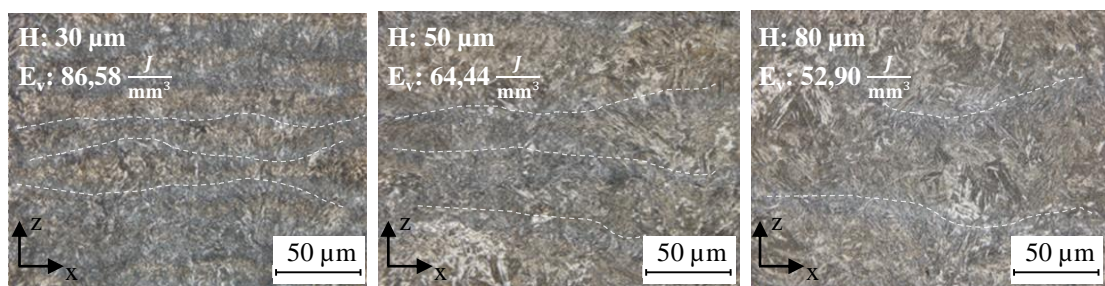
Abbildung 33: Fertigungsparameter und Aufbauraten der optimierten Parametersätze für die ausgewählten Schichtstärken

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

Die Schlifffbilder sind nahezu frei von Poren und weisen keine Risse auf. Die verbliebenen Poren werden als Gasporen mit einem Durchmesser von unter  $15\ \mu\text{m}$  quantifiziert. Dies führt zu einer relativen Dichte von 99,96 % bei  $30\ \mu\text{m}$  Schichtstärke, 99,87 % bei  $50\ \mu\text{m}$  Schichtstärke und 99,93 % bei  $80\ \mu\text{m}$  Schichtstärke. Im Vergleich der Schichtstärken ist eine Zunahme der Laserleistung und gleichzeitige Abnahme der Scangeschwindigkeit für die optimierten Parametersätze zu erkennen. Breitere Schmelzbäder bedingen auch eine Zunahme des Spurbabstands bei erhöhten Schichtstärken. Dies führt dazu, dass die niedrigste Schichtstärke die höchste Energiedichte aufweist. Im Vergleich zu KAMPS besitzt der Parametersatz bei einer  $30\ \mu\text{m}$  Schichtstärke eine um  $200\ \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  erhöhte Scangeschwindigkeit (KAMPS 2018). Dies kann auf eine verbesserte Anlagentechnik, wie erhöhte Schutzgasgeschwindigkeit und niedrigerer Restsauerstoffgehalt, aber auch auf die Verwendung von etwas größerem Pulver ( $D_{10,\text{KAMPS}}: 9,5\ \mu\text{m}$ ;  $D_{10,\text{SCHMITT}}: 28,4\ \mu\text{m}$ ) zurückgeführt werden.

Insgesamt zeigt sich, dass der Werkstoff 16MnCr5 in einer Vielzahl von Schichtstärken flexibel verarbeitet werden kann. Dabei lässt sich die Aufbaurrate ( $v_{\text{th}}$ ) um den Faktor 3 steigern, was die Wirtschaftlichkeit verbessert. Laut SCHNECK tragen neben der Aufbaurrate noch weitere Faktoren wie die Beschichtungszeit zur Systemleistung bei (SCHNECK 2021). Eine Steigerung der Aufbaurrate um den Faktor 3 steigert die Wirtschaftlichkeit des Laser-Strahlschmelzsystems anlagen- und bauteilabhängig nur um den Faktor 2 bis 2,5.

Zur späteren Auswahl einer geeigneten Schichtstärke werden das resultierende Gefüge, die Härte und die erzielbare Oberflächenqualität ermittelt. Bei der Betrachtung des Gefüges nach einer Ätzung mit 2 %-Nital im Querschliff in Aufbaurichtung (z-Richtung) zeigt sich in allen drei Schichtstärken der schichtweise Aufbau durch horizontal verlaufende Schmelzbahnen aus dem Laser-Strahlschmelzprozess (vergleiche Abbildung 34).



Angabe der Schichtstärke und Energiedichte; Aufbaurichtung: z-Richtung

Abbildung 34: Vergleich der Mikrostruktur von 16MnCr5 bei variiertem Schichtstärke mit Markierungen des schichtweisen Aufbaus

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

Die gerichtete Erstarrung von den Schmelzbadgrenzen zum Schmelzbadinneren führt dazu, dass feine Gefügebestandteile an den Grenzen gebildet werden, während größere Strukturen im Inneren vorliegen. Ähnliche Effekte sind bei Nickelbasis-Legierungen bekannt (SCHLICK 2017). Dabei ist ein Kornwachstum über die Schichten zu erkennen, wie es bereits für Ti6Al4V bestätigt wurde (THIJS ET AL. 2010). Bei einer Schichtstärke von 30  $\mu\text{m}$  kann zwischen ferritischen, bainitischen und martensitischen Gefügeanteilen unterschieden werden. Ferritische Anteile (helle Bereiche) treten sowohl als polygonaler als auch nadeliger Ferrit auf. Die dunkleren Bereiche bestehen aus einem feinen bainitisch-martensitischen Mischgefüge. Größere ferritische Strukturen liegen zunehmend im Inneren der Schmelzbäder vor, da der Temperaturgradient durch die bereits erstarrten Schmelzbäder abnimmt (CHEN ET AL. 2017). Mit steigender Schichtstärke nimmt der Anteil der ferritischen Phase deutlich zu. Ebenso ist ein generell gröberes Gefüge zu sehen. Dies stimmt mit der Modellvorstellung überein, dass breitere und tiefere Schmelzbäder, wie sie bei hohen Schichtstärken für einen guten Schichtverbund notwendig sind, etwas langsamer abkühlen und dadurch eine Vergrößerung des Gefüges mit erhöhten ferritischen Anteilen stattfindet.

Zur Quantifizierung des Gefüges wurden Härtemessungen an den jeweiligen Probekörpern durchgeführt. Dazu wurden jeweils zehn Messungen im Kernbereich erstellt. Die Auswertung ist in Abbildung 35 dargestellt.

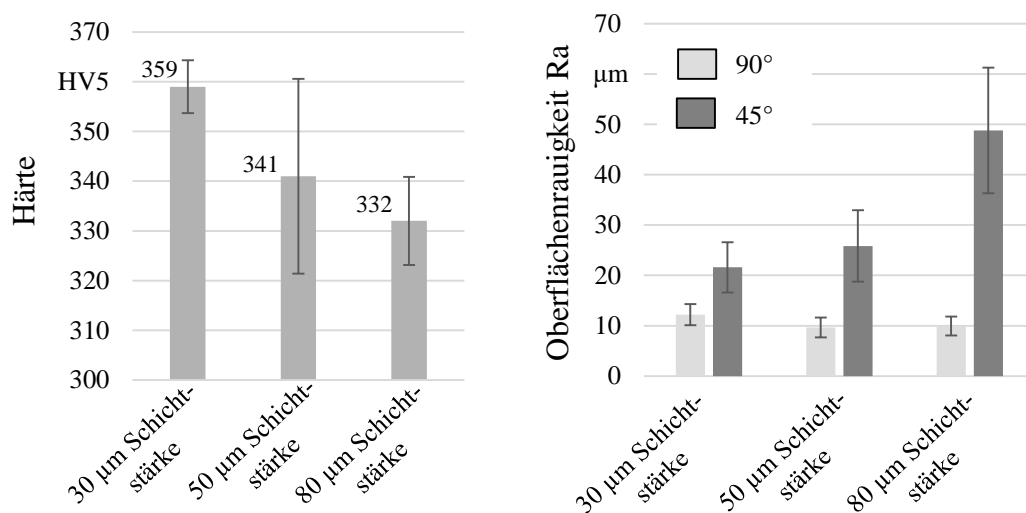


Abbildung 35: Vergleich der Härte und der Oberflächenqualität in zwei Aufbauwinkeln in Abhängigkeit der Schichtstärke

Korrespondierend zu den erhöhten ferritischen Gefügebestandteilen nimmt die Härte mit steigender Schichtstärke von 359 zu 332 HV5 ab. Bei der Betrachtung der erzielbaren Oberflächenqualität in zwei Aufbauwinkeln (siehe Abbildung 35 rechte Seite) haben alle Schichtstärken an der Außenseite (90° Aufbauwinkel) eine Rauigkeit von unter Ra 15  $\mu\text{m}$ . Ein Grund kann die sinkende Schichtanzahl mit weniger Schichtübergängen in Aufbaurichtung sein. Die Oberflächenrauigkeit der 45°-Fläche verdoppelt sich im Mittel von Ra 21  $\mu\text{m}$  auf mehr als Ra 48  $\mu\text{m}$  bei einer Schichtstärke von 80  $\mu\text{m}$ . Zur weiteren Verbesserung der Oberflächenrauigkeit kann ein Konturparameter eingeführt werden. Hierzu sei auf die Arbeiten von KAMPS 2018 und SCHMITT ET AL. 2018 verwiesen, die einen niedrigen Energieeintrag durch eine höhere Scangeschwindigkeit im Konturparameter als vorteilhaft beschreiben.

### **5.4 Vorgehen zur Entwicklung eines angepassten Parametersatzes für dünne Strukturen**

Für dünnere Strukturen kann der entwickelte Parametersatz für Volumenkörper nicht optimal sein, da die Wärmeleitung in komplexen Geometrien, z. B. durch eine veränderte Kontaktfläche zu unverfestigtem Pulver, verändert ist. Die Notwendigkeit, angepasste Parametersätze für Leichtbaustrukturen im Laser-Strahlschmelzen zu nutzen, ist bekannt (MERKT 2015, GROßMANN 2020). Eine Einteilung geometrischer Strukturen im Verhältnis zum Fokusdurchmesser und eine Übersicht verfügbarer Qualifizierungsmethoden ist in Abbildung 36 aufgeführt.

Für die Anwendung der Methoden sei auf die genannte Literatur verwiesen. Bei einem Großteil der berücksichtigten Methoden werden die Schmelzbadbreite- und -tiefe als Bewertungskriterien betrachtet; diese können direkt aus den Vorversuchen aus Abschnitt 5.2 übernommen werden.



## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

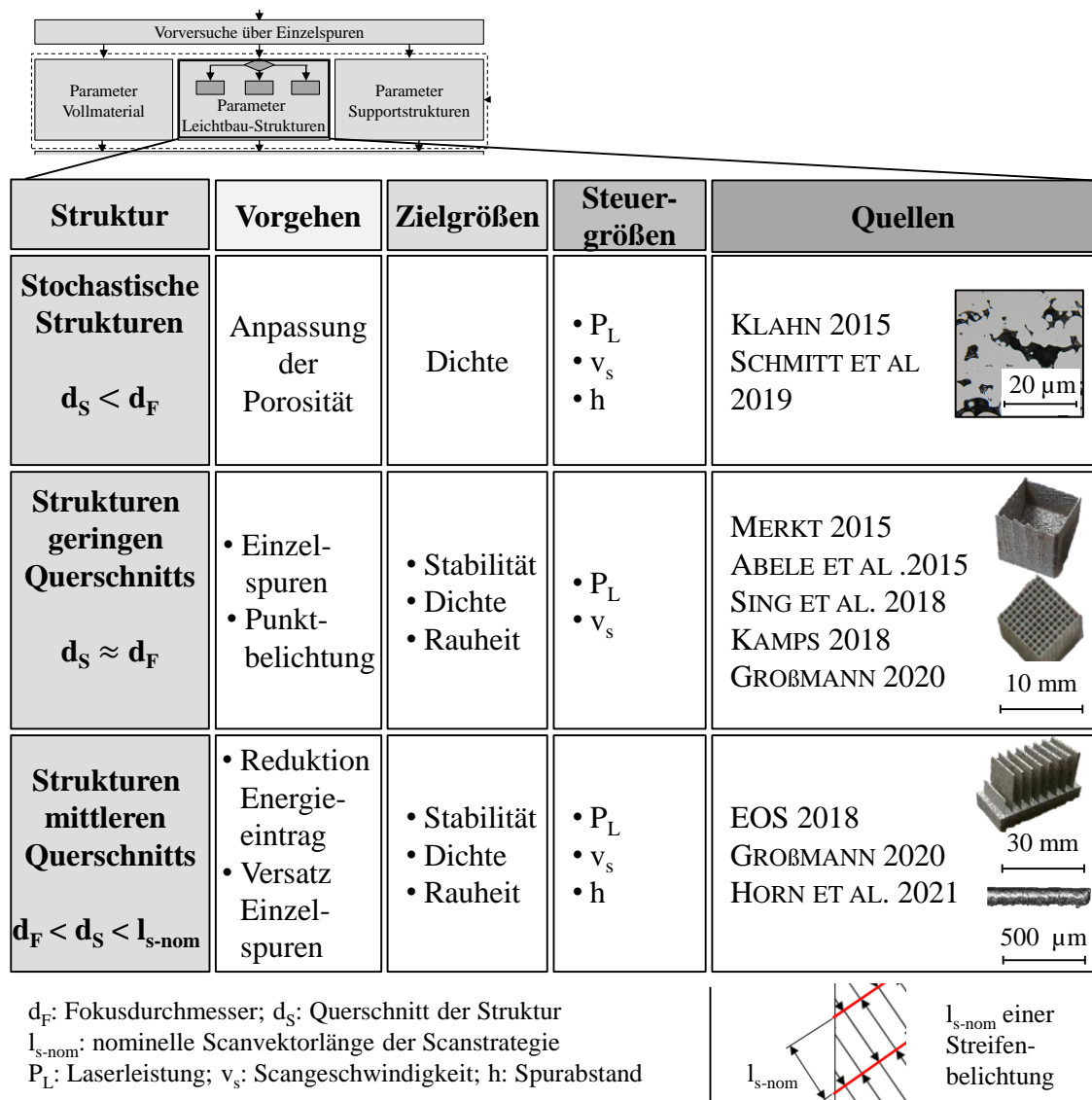


Abbildung 36: Übersicht der Vorgehensweisen zur Parameteranpassung zur Fertigung von Leichtbaustrukturen mit verringertem Querschnitt

Für die ausgewählte Anwendung des Leichtbauzahnrad sind Strukturen mit einem minimalen Querschnitt von 3 mm ermittelt worden (vgl. Abschnitt 5.1). Dies fällt in die dritte Kategorie des ‚mittleren Querschnitts‘ aus Abbildung 33. Das Vorgehen der Anpassung des Energieeintrags wird im Folgenden am Werkstoff 16MnCr5 erläutert. Für Ergebnisse bei Strukturen eines geringen Querschnitts und stochastischen Strukturen aus dem Werkstoff 16MnCr5 sei auf (SCHMITT ET AL. 2019b, SCHMITT ET AL. 2021b) verwiesen. Stochastische Strukturen aus dem Werkstoff 16MnCr5 mit einer Dichte von 89 % können mit erhöhter Scangeschwindigkeit von  $2200 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  hergestellt werden (SCHMITT ET AL. 2019b). Für Strukturen mit geringem Querschnitt im Bereich des Fokusbereichs des Lasers eignet sich eine Laserleistung von 200 W und eine Scangeschwindigkeit von

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

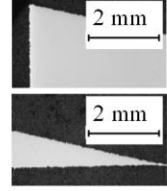
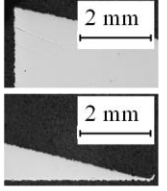
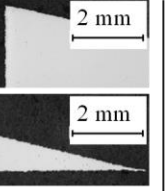
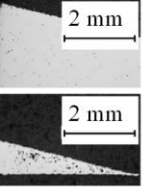
1500  $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$  zum Aufbau von Einzelspuren oder Gittern ohne Konturüberhöhungen (SCHMITT ET AL. 2021b).

Bei der Fertigung von Strukturen mittleren Querschnitts kann es durch die reduzierte Scanvektorenlänge und damit schnelleren Wiederkehrzeiten des Lasers zu einem Wärmestau kommen. Zur Vermeidung dieses Phänomens kann die Laserleistung in Abhängigkeit von der Scanvektorenlänge reduziert werden. Ausgehend von der Scanvektorenlänge des Volumenparametersatzes wird diese um den Reduktionsfaktor ( $r$ ) verringert (siehe Abbildung 37).

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Auswahl der Laserleistungsreduktion</li> <li>2. Experimentelle Fertigung der Probenkörper</li> <li>3. Bewertung der Probenkörper</li> <li>4. Auswahl eines Parametersatzes</li> </ol>	<p>Reduktion der Laserleistung in Abhängigkeit der Scanvektorenlänge:</p> $P_r = P_L * \left(1 - r * \frac{l_{s-nom} - l_s}{l_{s-nom}}\right)$ <p> <math>P_r</math>: Reduzierte Laserleistung  <math>r</math>: Reduktionsfaktor  <math>l_s</math>: tatsächliche Scanvektorenlänge  <math>l_{s-nom}</math>: nominelle Scanvektorenlänge der Scanstrategie  <math>P_L</math>: Laserleistung des Vollmaterialparameters [EOS GBMH 2018]         </p>	
---	---	--

Abbildung 37: Berechnung der Laserleistung nach der Scanvektorenlänge

Als Bewertungskriterien für die Untersuchungen werden die Oberflächenqualität, das ausgebildete Gefüge in Relation zum Volumenkörper (zur Vermeidung von Inhomogenitäten) und die Porosität herangezogen. Bei einer schrittweisen Implementierung des Reduktionsfaktors ( $r = 0,25; 0,5; 0,75$ ) zeigt sich, dass bei einem Faktor von 0,5 und 0,75 mit einer gesteigerten Porosität zu rechnen ist (siehe Abbildung 38).

Dichte im Querschliff (x-y Ebene)				
Gefüge*	5	5	3	2
Oberflächen-güte*	3	4	2	2

\*Einfache Punktbewertung nach LINDEMANN 2009: 1-5 Punkte; 1: gering, 5: hoch  
 $d_f$ : Fokusdurchmesser;  $d_s$ : Querschnitt der Struktur;  $l_{s-nom}$ : nominelle Scanvektorenlänge der Scanstrategie

Abbildung 38: Effekt der Laserleistungsreduktion auf den Werkstoff 16MnCr5

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

---

Die verbleibende Laserleistung ist für eine optimale Schmelzbadgestalt und -tiefe nicht ausreichend. Bei einem Reduktionsfaktor von 0,25 ist keine verstärkte Porosität zu erkennen. Ebenso liegt ein bainitisch-martensitisches Gefüge mit geringen Ferritanteilen (siehe Abbildung 95 im Anhang) ähnlich dem Volumenkörper vor. Gesteigerte Reduktionsfaktoren führen zu einer Vergrößerung und zu einer mangelnden Verschweißung der Schichten. Die Oberflächenqualität ist bei einer Verwendung des Reduktionsfaktors 0,25 am besten, da hier geringere Rauigkeiten gemessen werden und keine Verfärbungen wie Anlauffarben, im Vergleich zur Verwendung keines Reduktionsfaktors, auftreten. Bei höheren Reduktionsfaktoren verschlechtert sich die Oberflächenqualität, was mit der erhöhten Porosität zusammenhängt. Für die Fertigung der 3-mm-Strukturen im Leichtbauzahnrad erweist sich ein Reduktionsfaktor von 0,25 als optimal.

### 5.5 Vorgehen zur Entwicklung eines Parametersatzes für Supportstrukturen

Zur Überwindung von Fertigungsrestriktionen bei der Herstellung von komplexen (Leichtbau-) Geometrien werden Supportstrukturen (auch als Stützstrukturen bezeichnet) eingesetzt (siehe Abschnitt 3). Die Aufgabe der Supportstrukturen besteht dabei in der Verankerung des Bauteils auf der Bauplatte, der Wärmeableitung in die Bauplatte, der Stützung des Schmelzbads in Überhängen und der Erhöhung der Bauteilsteifigkeit gegenüber Beschichtungskräften und Eigenspannungen (GAO ET AL. 2015, HUSSEIN ET AL. 2013, LINDECKE ET AL. 2018).

Bei bisherigen Ansätzen zur Entwicklung von **Fertigungsparametersätzen für Supportstrukturen** wurde ein semi-quantitativer Ansatz gewählt, bei dem Homogenität und Geradheit von Einzelspuren optisch bewertet werden (MORGAN ET AL. 2017). Einen ebenso semi-quantitativen Ansatz verfolgen JÄRVINEN ET AL. bei der Bewertung (0-5 Punkte) der Entfernbareit von Supportstrukturen (JÄRVINEN ET AL. 2014). Geeignete Messmethoden zur Bewertung von Fertigungsparametersätzen der Supportstrukturen sind daher zu entwickeln. Supportstrukturen werden oft manuell nach dem Bauprozess entfernt (BARTSCH ET AL. 2020). Beobachtungen zeigen, dass dabei eine drehende Torsionsbewegung zielführend ist. Daher wird zur Bewertung der Entfernbareit die **maximale Schubspannung** unter Torsionsbelastung als Messgröße herangezogen. Für eine einfache und schnelle Prüfung wird ein akustischer Drehmomentschlüssel im Bereich von 4–20 Nm eingesetzt. Zur Quantifizierung des Einflusses der Fertigungsparameter auf die Festig-

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

keit von Supportstrukturen wird die **maximale Zugspannung** in einem angepassten Zugversuch bestimmt. Variiert werden die Steuergrößen Laserleistung ( $P_L$ ), Scangeschwindigkeit ( $v_s$ ) und Schichtstärke ( $H$ ). Neben den Fertigungsparametern wird in einem zweiten Schritt der Einfluss der Supportgeometrie, nämlich Gitterabstand und Perforation, auf die Entfernbarkeit und Festigkeit ermittelt. Vorgehensweise, Variationen und verwendete Probekörper sind in Abbildung 39 dargestellt (KEMPTER 2020).

	Zielgröße	Variierten Steuergrößen	Probekörper
1. Supportfertigungsparameter	Entfernbarkeit (maximale Schubspannung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laserleistung <math>P_L</math></li> <li>• Scangeschwindigkeit <math>v_s</math></li> <li>• Schichtstärke <math>H</math></li> </ul>	
	Festigkeit (maximale Zugspannung)		
2. Supportgeometrie	Entfernbarkeit (maximale Schubspannung)	Gitterabstand: 	
	Festigkeit (maximale Zugspannung)	Perforation: 	

Abbildung 39: Vorgehen zur Bestimmung der Supportparameter und Eigenschaften nach SCHMITT ET AL. 2020c

Die Probekörper wurden auf der EOS M290 mit Pulver der Charge 1 gefertigt. Für die verwendete Supportstruktur kam ein in der Industrie verbreiteter rechtwinkliger Gittersupport mit einem Gitterabstand ( $h_G$ ) von 1,5 mm zum Einsatz (LINDECKE ET AL. 2018). Weitere Merkmale sind in Tabelle 6 aufgeführt.

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

Tabelle 6: Eigenschaften der Supportstruktur

Supporttyp	Gitterabstand	Perforation	Füllgrad	Flächenträgheitsmoment
-	mm <sup>2</sup>	-	%	mm <sup>4</sup>
Gitter	1,5 x 1,5	nein	13	75,22

In einem ersten Schritt wurden die Steuergrößen Laserleistung ( $P_L$ : 75–300 W), Scangeschwindigkeit ( $v_s$ : 800–1250 mm/s) und Schichtstärke (H: 0,03 und 0,06 mm) variiert. Bei der Verwendung eines 30- $\mu$ m Parametersatzes für das Bauteil ergibt sich eine Supportbelichtung in jeder oder jeder zweiten Schicht mit dem Potenzial, die Fertigungszeit zu verringern. Daraus resultiert eine Energiedichte zwischen 13,7 und 171,23  $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$  (siehe Formel 3). Für eine ausreichende statistische Absicherung wurden fünf Probekörper pro Parametersatz gefertigt. Durch die große Variation der Energiedichte ist mit Baufehlern bei Proben im unteren und oberen Grenzbereich der Energiedichte zu rechnen. Die Probenanzahl wurde auf Grund dieses Risikos erhöht um trotzdem eine Auswertung vornehmen zu können. Aus der gemessenen maximalen Zugkraft bzw. dem maximalen Torsionsmoment wurde die Zug- bzw. Schubfestigkeit ermittelt (MAHNKEN 2012).

In Abbildung 40 ist die Auswertung der Schubfestigkeit für die gefertigten Probekörper dargestellt. Es ist ersichtlich, dass Baufehler bei einem Teil der Körper entstanden sind. Diese lassen sich Parametersätzen mit sehr niedrigen Energiedichten zuordnen. Da eine mechanische Prüfung nicht möglich ist und solche Instabilitäten einen Einsatz bei komplexeren Bauteilen verhindern, werden diese Proben ausgeschlossen. In der Auswertung zeigt sich, dass die Fertigungsparameter einen wesentlichen Einfluss auf die Schubfestigkeit haben, da diese in einem großen Bereich von 316 bis ca. 861 N/mm<sup>2</sup> variiert. Zusätzlich ist ein linearer Zusammenhang zwischen angewandter Energiedichte und resultierender Schubfestigkeit (Korrelationsfaktor  $r$ : 0,9) erkennbar. Dieser wird hauptsächlich von einer steigenden Laserleistung (Korrelationsfaktor  $r$ : 0,7) und weniger von der Lasergeschwindigkeit und der Schichtstärke beeinflusst. Eine vollständige Korrelationsmatrix ist Tabelle 22 des Anhangs zu entnehmen.

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

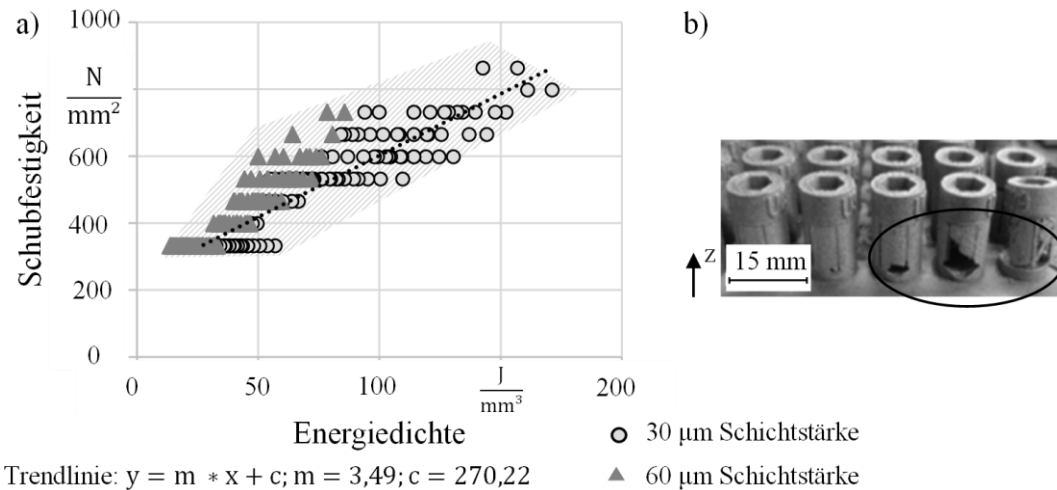


Abbildung 40: a) Schubfestigkeit in Abhängigkeit von den Fertigungsparametern b) Aufgebaute Probekörper mit Defekten

In einem nächsten Schritt wurde die Anzahl der Proben reduziert, da der Zugversuch aufwändiger ist als die durchgeführte Torsionsprüfung. Abbildung 41 zeigt die resultierenden Probekörper und die Auswertung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von den Fertigungsparametern.

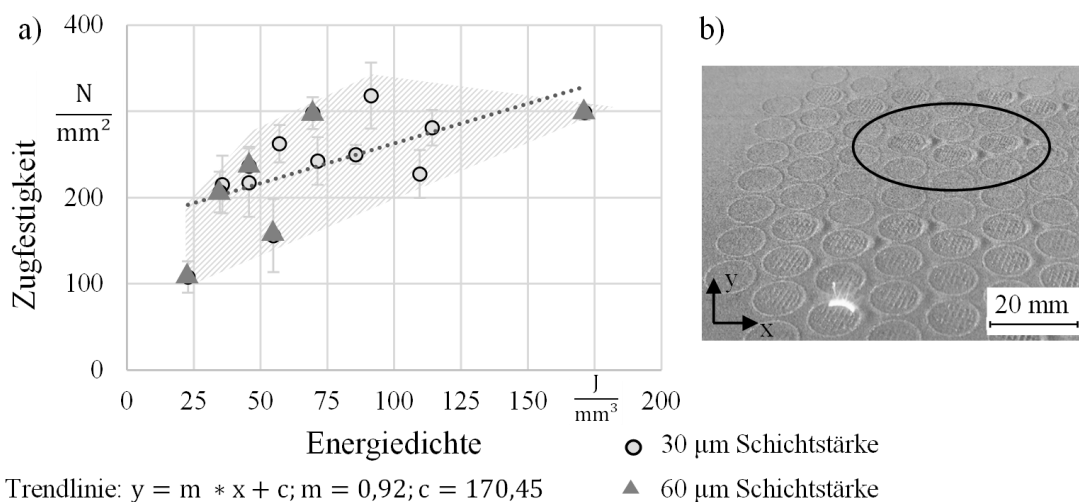


Abbildung 41: a) Resultierende Zugfestigkeit bei variierten Fertigungsparametern b) Fertigung der Probekörper mit Pulveranhäufung

Während der Herstellung war zu sehen, dass es zu Ausbuchtungen und Pulveranhäufungen an einigen Probekörpern kam. Diese sind vornehmlich an den Kreuzungspunkten der Gitter feststellbar. Das spricht für eine Materialanhäufung auf Grund eines zu hohen Energieeintrags. Allerdings führten keine der Auffälligkeiten zu einer Prozessunterbrechung. Der Prozess kann demnach als stabil in den Bereichen der verwendeten Parameter angesehen werden. Die Supportstrukturen

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

erwiesen sich alle als spröde im Zugversuch und es konnte nahezu kein elastisches Verhalten ermittelt werden. Es zeigt sich eine lineare Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Energiedichte. Die Zugfestigkeit variiert dabei in einem Bereich von 113 bis 316 N/mm<sup>2</sup>. Allerdings ist die Abhängigkeit geringer im Vergleich zur resultierenden Schubspannung (Korrelationsfaktor r: 0,65).

Werden die resultierenden Schub- und Zugfestigkeiten gleicher Energiedichte verglichen, so ergibt sich ebenfalls gemittelt ein linearer Zusammenhang. Ziel ist eine hohe Zugfestigkeit zur Verankerung des Bauteilbereichs an der Bauplattform bei gleichzeitig geringer Schubfestigkeit zur aufwandsarmen Entfernung. Bei einer Zugfestigkeit von 250 N/mm<sup>2</sup> kann die Entfernbarekeit (sprich Schubfestigkeit) vom Anwendenden in drei Stufen zwischen 320, 530 und 740 N/mm<sup>2</sup> variiert werden. Außerdem zeigt sich im Vergleich der Verhältnisse zwischen maximaler und minimaler Zug- und Schubfestigkeit (2,80 und 2,82), dass beide Werte im gleichem Verhältnis durch die Fertigungsparameter beeinflusst werden können. wie in Abbildung 42 dargestellt ist.

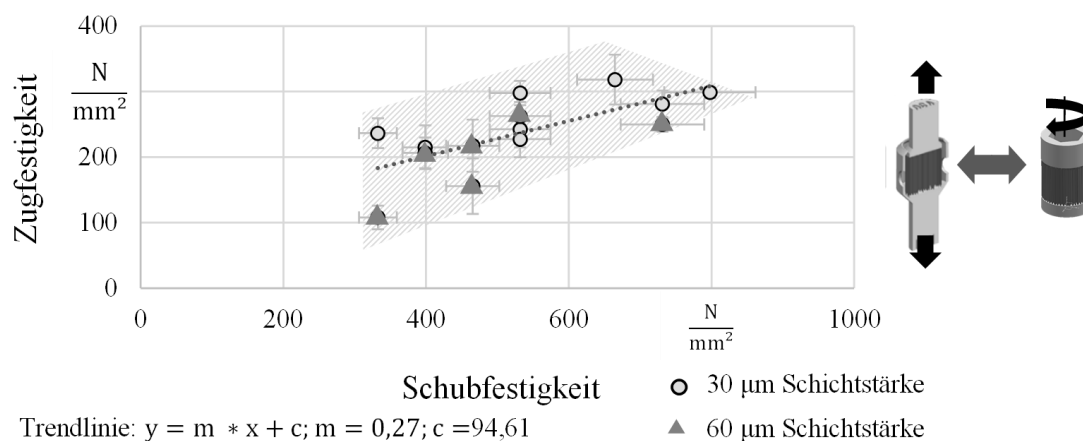


Abbildung 42: Resultierende Zug- und Schubfestigkeiten je Parametersatz

Geeignete Supportfertigungsparametersätze können nun ausgewählt werden. Eine hohe Zugfestigkeit ist zu bevorzugen, um einem Verzug der Bauteile oder Bauteilbereiche entgegenzuwirken. Gleichzeitig sollte die Schubfestigkeit für eine bessere Stützentfernung minimiert werden. In einem Kompromiss zwischen diesen Eigenschaften lassen sich gute Kombinationen bei einer Schubfestigkeit von 530 N/mm<sup>2</sup> finden, was zu Zugfestigkeiten von 300 N/mm<sup>2</sup> führt. Dies liegt nur geringfügig unter der maximal erreichbaren Festigkeit. Diese Eigenschaften sind mit einer Laserleistung von 175 W, einer Scangeschwindigkeit von 1150 mm/s und einer Schichtstärke von 0,03 mm zu erzielen.

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

Mit den festgelegten Fertigungsparametern wird nun der Einfluss der geometrischen Faktoren bestimmt. Es wird einerseits der Füllgrad betrachtet, der über den Gitterabstand (1,0 mm, 1,5 mm und 2,5 mm) in drei Stufen (9, 13 und 24 %) variiert wird. Andererseits wird der Einsatz einer Perforation der Supportstrukturen untersucht. Dabei werden wabenförmige Aussparungen im Support genutzt, um die Entfernbarekeit des Pulvers zu verbessern. Bei Verwendung eines sehr breiten Gitters und eines hohen Maßes an Perforation besteht das Potenzial, die Fertigungszeit und damit auch die Fertigungskosten weiter zu reduzieren. Allerdings sind die Auswirkungen auf die Festigkeit und Entfernbarekeit der Supportstrukturen bisher nicht bekannt.

Mit der Verringerung des Gitterabstands steigt der Füllgrad der Supportstruktur und damit auch die Anzahl der Kontaktflächen zum Vollmaterial. In Abbildung 43 ist erkennbar, dass mit wachsendem Füllgrad die Schubfestigkeit nahezu linear steigt.

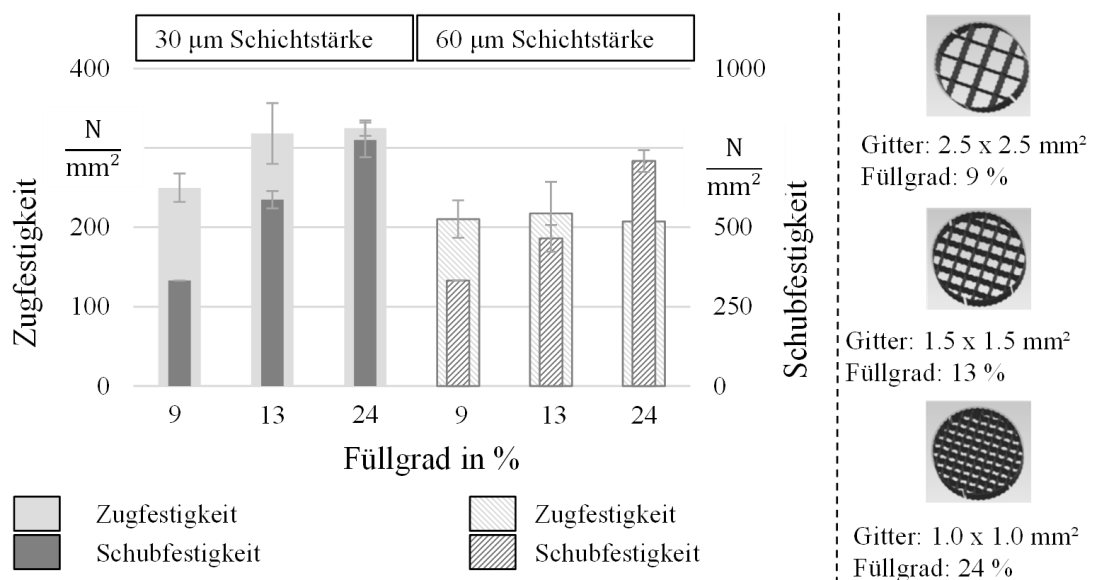


Abbildung 43: Einfluss des geometrischen Füllgrads auf die Zug- und Schubfestigkeit von Supportstrukturen

Dies geschieht unabhängig von der verwendeten Schichtstärke. Im Vergleich dazu steigt die Zugfestigkeit bei einer Erhöhung des Füllgrads bei einer Schichtstärke von 0,03 mm von 13 auf 24 % nicht weiter an. Bei der Verwendung einer Schichtstärke von 0,06 mm ist nahezu kein Einfluss des Füllgrads zu sehen. Da die Fläche mit zunehmendem Füllgrad größer wird, steigt jedoch die absolut ertragbare Zugkraft. Einen ähnlichen Effekt beschreiben BOBBIO ET AL. und erklären diesen mit vermehrten Defekten entweder im Support oder an der Kontaktfläche bei geringeren Schichtstärken (BOBBIO ET AL. 2017). Es ist festzuhalten, dass eine Erhöhung



## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

des Füllgrads nicht mit einer Steigerung der Zugfestigkeit einhergeht (Normierung durch die Fläche), während die Schubfestigkeit verstärkt und die Entfernbarkeit erschwert wird. Die resultierende absolute Haltekraft des Supports nimmt proportional zum steigenden Füllgrad zu und kann damit an die Anforderungen des Bauteils angepasst werden.

Zur verbesserten Pulverentfernung kann die Supportstruktur mit Perforationen versehen werden. Diese werden in die Wände des Gitters eingebracht (siehe Abbildung 44 rechte Seite).

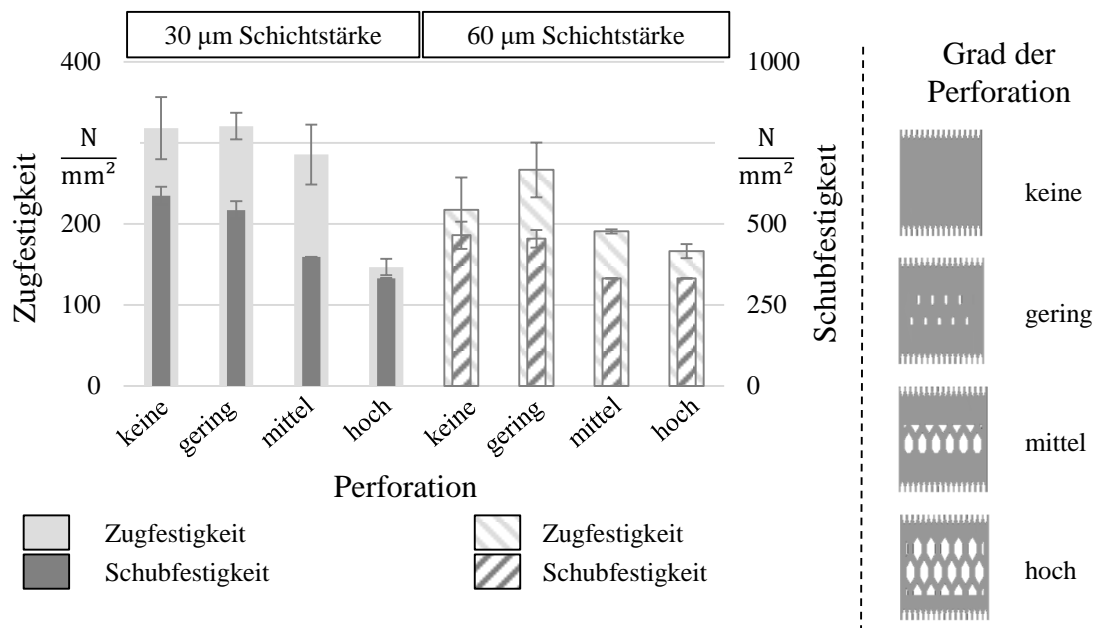


Abbildung 44: Einfluss der Perforation auf die Zug- und Schubfestigkeit in Supportstrukturen

Durch den Einsatz einer geringen Perforation werden weder die Zugfestigkeit noch die Schubfestigkeit im Rahmen der Schwankungen der Messwerte reduziert. Bei weiterer Steigerung des Perforationsgrads nimmt die Zugfestigkeit um 64 % bei einer Schichtstärke von 0,03 mm und um 24 % bei einer Schichtstärke von 0,06 mm im Vergleich zu keiner Perforation ab. Die Schubfestigkeit wird dagegen um 44 % (0,03 mm Schichtstärke) und um 29 % (0,06 mm Schichtstärke) reduziert. Es ist festzuhalten, dass die Zugfestigkeit stark durch die Anzahl der Verbindungsstellen zum Vollmaterial bestimmt wird, da erst eine ausgeprägte Schwächung der Supportwände durch die Perforation erfolgen muss, um die Zugfestigkeit signifikant zu reduzieren. Perforationen bis zu einem mittleren Grad zeigen die Möglichkeit, die Pulverentfernbarkeit zu verbessern, ohne die Zug- und Schubfestigkeit maßgeblich zu verringern.

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

Durch die vorgestellte Methode lassen sich Fertigungsparameter und der Einfluss der Geometrie effektiv und mit Hilfe quantifizierender Messmethoden zur Bewertung der Festigkeit und der Entfernbareit ermitteln. Die Fertigungsparameter beeinflussen sowohl Zug- als auch Schubfestigkeit deutlich. Durch den Vergleich von Zug- und Schubfestigkeit ist es möglich, ein bauweisen- bzw. geometriespezifisches Trade-Off durchzuführen, um geeignete Fertigungsparametersätze für die Supportstruktur auszuwählen. Zusammen mit der Analyse von Gitterabstand und Perforation kann der Anwender ein ganzheitliches Supportstruktur-Design auswählen. Dabei sollte generell eine geringe Perforation genutzt werden, um die Entfernung von Restpulver zu ermöglichen. Die Zugfestigkeit der Supportstrukturen liegt, je nach Fertigungsparametersatz, bei 10–30 % der Zugfestigkeit des Vollmaterials (Zugfestigkeit Vollmaterial: ca. 1050 N/mm<sup>2</sup>; vergleiche SCHMITT ET AL. 2020b).

### 5.6 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Zur Bewertung des entwickelten Parametersatzes, der aus Volumenparametersatz, Supportparametersatz und Parametersatz für Leichtbaustrukturen besteht, wird die Leistungsfähigkeit mit den gestellten Anforderungen aus Abschnitt 5.1 verglichen. Als Orientierung dient hierbei VDI 2225 Blatt 3 zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung von Lösungsmöglichkeiten in der Produktentwicklung (VDI 2225 BLATT 3).

<b>Volumenparametersatz:</b>		30 µm Schichtstärke	50 µm Schichtstärke	80 µm Schichtstärke
	Anforderung			
Min. Bauteildichte	99,5 %	✓	✓	✓
Oberflächengüte	Ra < 20 µm	✓	(✓)	✗
Aufbaurrate	-	gering	mittel	hoch

<b>Parametersatz dünne Strukturen:</b> Strukturen bis 3 mm Stegbreite fertigbar	✓	
<b>Supportparametersatz:</b> Supportparametersatz entwickelt und nutzbar	✓	

einsatzbereit	Entwicklung notwendig
---------------	--------------------------

Abbildung 45: Bewertung des entwickelten Parametersatzes für eine Verzahnung mit Leichtbaustrukturen hinsichtlich der Anforderungserfüllung

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

---

In der Bewertung, dargestellt in Abbildung 45, wird deutlich, dass die Anforderungen vollständig durch den Einsatz des Parametersatzes mit einer Schichtstärke von 30  $\mu\text{m}$  erfüllt werden. Der Parametersatz mit einer Schichtstärke von 50  $\mu\text{m}$  liegt im Bereich der Oberflächengüte im Grenzbereich der Anforderungen. Die Entwicklung eines Konturparameters oder der Einsatz von Nacharbeitsverfahren könnten weitere Verbesserungen mit zusätzlicher Entwicklungsarbeit erzielen. Der Parametersatz mit einer Schichtstärke von 80  $\mu\text{m}$  erfüllt die Anforderungen an die Oberflächengüte nicht. Im Zug dieser Arbeit wird daher der Parametersatz mit einer Schichtstärke von 30  $\mu\text{m}$  ausgewählt. Der Parametersatz für eine Schichtstärke von 30  $\mu\text{m}$  setzt sich wie folgt zusammen:

- Volumenparametersatz:  $P_L$  von 200 W,  $v_s$  von 1100 mm/s und  $h$  von 0,07 mm
- Konturparametersatz:  $P_L$  von 200 W und  $v_s$  von 1500 mm/s
- Parametersatz für dünne Strukturen: Reduktionsfaktor der  $r$  von 0,25
- Supportparametersatz:  $P_L$  von 175 W und  $v_s$  von 1150 mm/s

## 5.7 Analyse der As-built-Eigenschaften und Einordnung nach ISO 6336-5

Im nächsten Schritt werden die Materialeigenschaften von Probekörpern mit dem ausgewählten Parametersatz analysiert und mit den übergeordneten Materialanforderungen an Zahnräder aus der ISO 6336-5 verglichen.

Dazu wird im ersten Schritt die Legierungszusammensetzung des aufgebauten Materials ermittelt (siehe Tabelle 7).

*Tabelle 7: Vergleich der chemischen Zusammensetzung von Pulver und Bauteil*

Legierungselement	Einheit	C	Mn	Cr	Si	P	S	Fe
Grenzwerte nach DIN EN10084	Ma.-%	0,14– 0,19	1,0– 1,3	0,8– 1,1	$\leq 0,4$	$\leq 0,025$	$\leq 0,035$	Rest
Pulver	Ma.-%	0,15	1,05	0,9	0,19	-	-	Rest
Bauteil	Ma.-%	0,13	0,85	0,95	0,15	-	0,0004	Rest

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

---

Es wird ersichtlich, dass eine Abnahme des Kohlenstoff- und Mangangehalts vorliegt und diese nun außerhalb der zulässigen Grenzwerte nach DIN EN 10084 liegen. Insbesondere der abnehmende Kohlenstoffgehalt kann die resultierende Bauteilhärte reduzieren. Der Verlust von ca. 15 % liegt dabei in einem Bereich wie für die Werkstoffe 36CrNiMo6 und X46Cr13 beschrieben (ZHAO ET AL. 2015, JELIS ET AL. 2015). Die Zunahme im Chromgehalt könnte einerseits durch die Messunsicherheit hervorgerufen werden, da die Messung von Pulver und Bauteil durch unterschiedliche Geräte erfolgt oder es könnte eine Querkontamination beispielhaft mit dem Werkstoff 1.4404 vorliegen. Der Chromgehalt befindet sich trotzdem innerhalb der Grenzwerte nach DIN EN 10084. Die Veränderung ist als unkritisch anzusehen. In der ISO 6336-5 wird darüber hinaus ein Werkszeugnis gefordert, das durch den Pulverhersteller nicht geliefert werden konnte. Zusätzlich muss durch die Materialerzeugung im Laser-Strahlschmelzen ein neues Werkszeugnis für das Bauteil erstellt werden, da eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung erfolgt.

Die Analyse der Spurenelemente in Tabelle 8 zeigt, dass die Anforderungen an den Wasser- und Sauerstoffgehalt ab der Klasse ME nicht eingehalten werden können. Der Stickstoffgehalt ist in der ISO 6336-5 nicht spezifiziert. Der maximal zulässige Kalziumgehalt wird nicht erreicht.

*Tabelle 8: Vergleich der Spurenelemente des AM-Werkstoffs*

<b>Spurenelemente</b>	<b>AM-Werkstoff</b>	<b>ME-Anforderung</b>
Wasserstoffgehalt im Bauteil, ppm	8±1	< 2,5
Sauerstoffgehalt im Bauteil, ppm	125±10	< 25
Stickstoffgehalt im Bauteil, ppm	63±14	-
Kalziumgehalt im Bauteil, ppm	< 1	< 10

Die Analyse der Materialreinheit nach ISO 4967 ergab, dass im AM-Werkstoff keine sulfidischen Ausscheidungen auffindbar waren. Geringe Ausscheidungen auf Aluminiumbasis sowie wenige grobe Ausscheidungen auf Silikatbasis sind zu erkennen. Kugelförmige Oxide sind auffindbar, allerdings ist die Unterscheidung zwischen Oxid und einer Fehlstelle (Pore) nach ISO 4967 nicht zu treffen und diese Merkmale wurden basierend auf der Form den Oxiden zugerechnet. Insgesamt zeigt sich, dass die Reinheitsanforderungen der Klasse MQ erfüllt werden, während die der Klasse ME auf Grund der Oxide nicht erfüllt werden.

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

Tabelle 9: Auswertung und Vergleich der Reinheit des AM-Werkstoffs

Art der Einschlüsse nach ISO 4967									
	A		B		C		D		DS
	fein	grob	fein	grob	fein	grob	fein	grob	
AM	0	0	0,5	0	0	1	2	1,5	1
Zulässige Einschlüsse nach ISO 6336-5									
MQ	3,0	3,0	2,5	1,5	2,5	1,5	2,0	1,5	-
ME	2,5	1,5	2,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0

A: Sulfidische Ausscheidung

B: Aluminidische Ausscheidungen

C: Silikatische Ausscheidungen

D: kugelförmige Oxide

DS: kugelförmige Oxide, kreisförmig < 13 µm

Im nächsten Schritt wird das Gefüge nach dem Laser-Strahlschmelzen mit dem konventionellen Ausgangsgefüge verglichen. Eine Gegenüberstellung von zwei geätzten Schliffbildern ist in Abbildung 46 zu sehen.

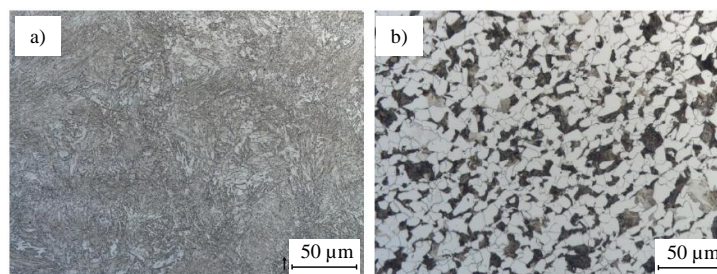


Abbildung 46: a) laser-strahlgeschmolzener Werkstoff b) konventioneller Werkstoff im normalgeglühten Anlieferungszustand (MALLOW ET AL. 2021)

Die Körner des Ausgangswerkstoffes sind gut zu erkennen und entsprechen der Anforderung von Korngröße 5 oder größer. Im laser-strahlgeschmolzenen Werkstoff liegt auf Grund der Abkühlraten ein noch feineres Gefüge vor und die Anforderungen der Klasse MQ und ME werden erfüllt.

Die in Tabelle 10 ersichtliche Gesamtauswertung belegt, dass Anforderungen der MQ- und ME-Klassen für den Wasser- und Sauerstoffgehalt und für die ME-Klasse zusätzlich die Reinheit nicht erfüllt werden können. Für Anforderungen aus

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

der Stahlherstellung wie den geforderten Umformgrad fehlen geeignete prozess-spezifische Anpassungen für AM-Verfahren wie das Laser-Strahlschmelzen.

*Tabelle 10: Vergleich der Materialanforderungen aus ISO 6336-5 und den erzielten AM-Materialeigenschaften nach dem Laser-Strahlschmelzen*

Anforderung	ML	MQ	ME	AM-Material
chemische Analyse	k. S. ✓	Werkszeugnis nach ISO 10474 ✗	Werkszeugnis nach ISO 10474 ✗	nein
Stahlherstellung	k. S. ✓	desoxidiert und veredelt	desoxidiert und veredelt	n. a.
H <sub>2</sub> -Gehalt	k. S. ✓	< 2,5 ppm ✗	< 2,5 ppm ✗	8 ppm
Reinheit	k. S. ✓	s. Tabelle 1 ✓	s. Tabelle 1 ✗	s. Tabelle 1
Schwefelgehalt	k. S. ✓	< 400 ppm ✓	< 400 ppm ✓	44 ppm
Sauerstoffgehalt	k. S. ✓	< 25 ppm ✗	< 25 ppm ✗	125 ppm
Kalziumgehalt	k. S. ✓	< 25 ppm ✓	< 10 ppm ✓	< 1 ppm
Umformgrad	k. S. ✓	5:1		n. a.
Korngröße vor der Wärmebehandlung	k. S. ✓	90 % ≥ 5 0 % < 3		100 % > 5

k. S.: keine Spezifikation

✓ Anforderung erfüllt

✗ Anforderung nicht erfüllt

n. a.: nicht anwendbar

### 5.8 Fazit

In diesem Abschnitt wurde das Vorgehen zur Bestimmung eines bauweisenspezifischen Parametersatzes vorgestellt und am Beispiel des Werkstoffs 16MnCr5 für ein Leichtbauzahnrad durchgeführt. Das Vorgehen hat Allgemeingültigkeit für das Laser-Strahlschmelzen, da etablierte Grundlagen aus der Schweißtechnik und bekannte Methoden aus dem Laser-Strahlschmelzen kombiniert und adaptiert werden. Des Weiteren werden bekannte, gut verfügbare und genormte Messmethoden

## Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes

(Zugversuch, Drehmomentschlüssel oder lichtmikroskopische Aufnahmen) genutzt, die eine allgemeine Verwendbarkeit sicherstellen. Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen zur Schmelzbadgeometrie werden sowohl zur Parametersatzentwicklung des Volumenkörpers als auch für dünne Strukturen wie Gitter und Wände genutzt. Daher ist das Vorgehen als effizient anzusehen. Die Anwenderin der Methode benötigt ein Grundwissen im Laser-Strahlschmelzen, aber es wird kein explizites Expertenwissen vorausgesetzt. Bei den Teilschritten der Methoden wird zur Berechnung verschiedener Kenngrößen und zur Einteilung von Strukturen der Fokussdurchmesser des Laserstrahls einbezogen. Durch den relativen Wert des Fokussdurchmessers ist die vorgestellte Methode anlagenunabhängig und eine Übertragbarkeit kann durch den Anwender vorgenommen werden.

Die präsentierte Methode stellt also einen Handlungsleitfaden zur Entwicklung eines bauweisenspezifischen Parametersatzes dar. Darüber hinaus wurden für den Werkstoff 16MnCr5 erstmalig Parametersatz für Support- und komplexe Leichtbaustrukturen entwickelt. Anwendungsbeispiele sind in Abbildung 47 zu sehen.

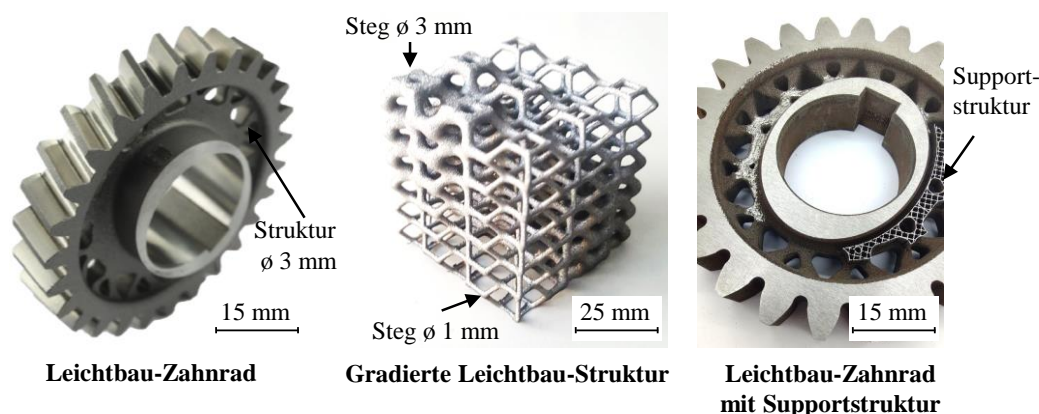


Abbildung 47: Anwendungsbeispiel des bauweisenspezifischen Parametersatzes

Die Anforderungen der ME- und MQ-Klasse an das Ausgangsmaterial nach ISO 6336-5 werden durch die niedrige Reinheit und zu hohe Gehalte an Wasserstoff und Sauerstoff nicht erfüllt. In diesem Zusammenhang wird ersichtlich, dass bestehende Normen an die Besonderheiten des Laser-Strahlschmelzens angepasst werden sollten bzw. Erweiterungen zur Berücksichtigung notwendig sind. Es zeigt sich, dass die Forderungen eines Umformgrads für AM-Werkstoffe nur mit einem zwischengelagerten Umformprozess möglich sind, der für die Materialerzeugung nicht notwendig ist. Parallel kommen bestehende Messverfahren wie die mikroskopbasierte Bewertung der Reinheit von Materialien an ihre Grenzen, da Poren auf Grund ihrer Form als Oxide bewertet werden müssen.

## 6 Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

Eine ganzheitliche Optimierung der Prozesskette mit Fokus auf das Laser-Strahlschmelzen wird in diesem Kapitel erarbeitet. Eine Optimierung einzelner Fertigungsprozesse ist nur unter Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den Fertigungsprozessen innerhalb einer Prozesskette sinnvoll (ZOCH 2009). Dazu wird zuerst eine anwendungsspezifische Prozesskette aufgestellt und es werden mögliche Wechselwirkungen literaturbasiert bestimmt. Anschließend werden Prozessgrößen im Laser-Strahlschmelzen variiert und die resultierende Bauteilqualität vor und nach dem Einsatzhärten wird untersucht. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden Wechselwirkungen quantifiziert, die als Grundlage für die anwendungsspezifische Auswahl von Prozessgrößen dienen. Das Vorgehen ist in Abbildung 48 dargestellt.

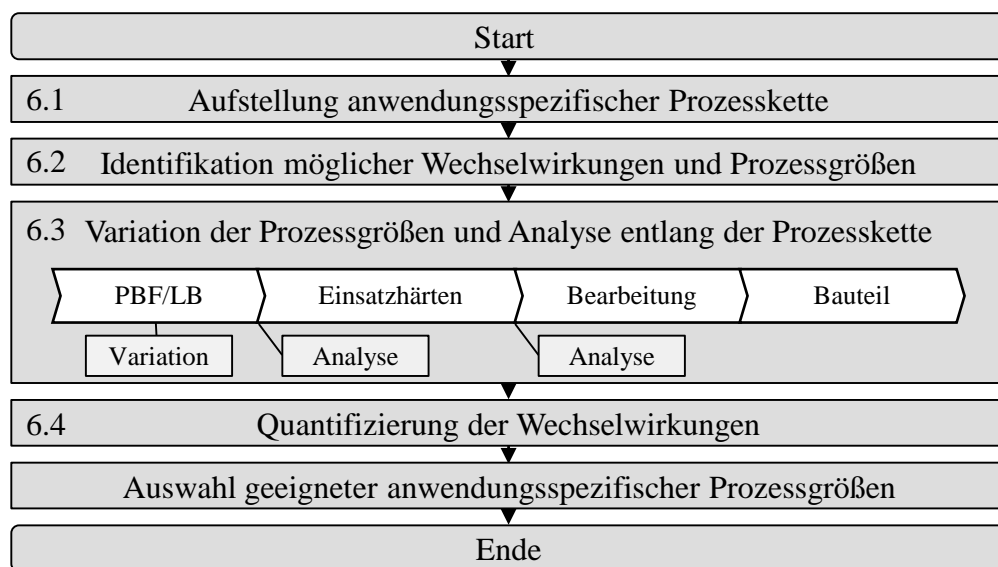


Abbildung 48: Vorgehen zur Auswahl der Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen (PBF-LB: Laser-Strahlschmelzen)

Aufbauend auf den Ergebnissen werden die Prozessgrößen ausgewählt, bevor eine vertiefte Analyse der Materialeigenschaften nach dem Einsatzhärten und eine Einordnung der AM-Werkstoffqualität nach ISO 6336-5 erfolgen.



## 6.1 Aufstellen der Prozesskette

Zu Beginn ist die Definition der zugrundeliegenden Prozesskette, hier auch als Referenzprozesskette bezeichnet, notwendig. Diese setzt sich literaturbasiert aus den Bereichen des Laser-Strahlschmelzens und der Verzahnungstechnik zusammen. Das Ausgangsmaterial für das Laser-Strahlschmelzen wird durch die Pulverherstellung, meist eine schmelz- oder drahtbasierte Gasverdüsung, bereitgestellt (DIETRICH 2019). Nach dem Laser-Strahlschmelzen erfolgt ein Spannungsarmglühen auf der Bauplattform. Anschließend werden Supportstrukturen entfernt und eine Weichbearbeitung durchgeführt. Dem nachgeschalteten Einsatzhärten folgt die Hartfeinbearbeitung, unter anderem der Nabe und der Zahnflanken (KOHLEHOF ET AL. 2012). Die dargestellte Referenzprozesskette in Abbildung 49 stellt eine Zusammenfassung der Literatur dar und dient als Ausgangsbasis für Versuchsplanung und Parameteridentifikation.



Abbildung 49: Referenzprozesskette für additive Bauteile aus Einsatzstahl

Insbesondere das Spannungsarmglühen wird nicht immer durchgeführt (ZIEBURA & MEINERS 2016, KONOWALCZYK ET AL. 2017, BEER ET AL. 2018). Dagegen beschreiben KLUGE ET AL. und KAMPS die Notwendigkeit, um die auftretenden inneren Spannungen in Bauteilen mit größeren Querschnitten zu reduzieren (KLUGE ET AL. 2017, KAMPS 2018). Auf die Durchführung eines heiß-isostatischen Pressens (HIP) wird verzichtet, da keine signifikanten Vorteile des teuren Verfahrens in der Anwendung für Einsatz- und Vergütungsstählen bekannt sind, wenn ausreichende Bauteildichten erzielt werden (BEER ET AL. 2018, DAMON ET AL. 2019).



## **Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette**

---

dem Lasersystem, z. B. Laserleistung oder Lasergeschwindigkeit, zugewiesen wird. Unter Anwendung des Vorgehens können sechs regelbare Prozessgrößen im Laser-Strahlschmelzen identifiziert werden. Die Größen des Prozessparametersatzes wie Laserleistung, Lasergeschwindigkeit und Hatchabstand werden nicht betrachtet, da eine Dichte von 99,5 % weiterhin erfüllt werden muss und diese nicht uneingeschränkt variiert werden können, ohne die Bauteildichte negativ zu beeinflussen (GU ET AL. 2013). Damit ergeben sich die drei regelbaren Prozessgrößen **Scanstrategie, Schutzgas und Bauplattentemperatur**, die als Grundlage für die Versuchsplanung dienen und im Folgenden gezielt variiert werden. Nach BARTELS ET AL. 2020 und KAMPS 2018 sind nach dem Laser-Strahlschmelzen folgende Eigenschaften gefordert, die als Bewertungskriterien dienen:

- Gleichmäßiges Gefüge und Duktilität zur Weichbearbeitung
- Geringer Verzug der Bauteile zur Erhalt der Maßhaltigkeit

Neben dem Laser-Strahlschmelzen hat das Einsatzhärten den größten Einfluss auf die verschiedenen Ebenen der Bauteilqualität. Zusätzlich ist das Potenzial für **Wechselwirkungen** zwischen diesen Prozesskettenschritten besonders hoch, weil das Ausgangsmaterial des Bauteils in chemischer Zusammensetzung, Gefüge und Bauteilgeometrie nahezu vollständig im Laser-Strahlschmelzen festgelegt wird. Neben den Prozessparametern des Einsatzhärtens, z. B. Aufkohldauer oder Härte-temperatur, spielt das Ausgangsmaterial eine tragende Rolle (BARGEL & SCHULZE 2018). Die chemische Zusammensetzung beeinflusst die Kohlenstoffdiffusion und bestimmt dadurch den sich ergebenden Kohlenstofftiefenverlauf, der den Härtetiefenverlauf bedingt (GEGNER ET AL. 2012). Zusätzlich bestimmt die Mikrostruktur durch die Karbidverteilung des auftretenden Gefüges die Art und Höhe der Eigenspannungen sowie das resultierende Rand- und Kerngefüge (HIP-PENSTIEL ET AL. 2002, HOFFMANN ET AL. 2018). Ziel ist es, einerseits mögliche Wechselwirkungen zwischen dem Laser-Strahlschmelzen und dem Einsatzhärten zu identifizieren, andererseits auch die erzielbaren Eigenschaften nach dem Einsatzhärten zu bewerten. Nach NIEMANN & WINTER 2003 und ISO 6336-5 sind nach dem Einsatzhärten folgende Eigenschaften als Basis erforderlich:

- Erreichung der Zieleinsatzhärtetiefe ( $\pm 0,1$  mm, nach TRUTE 2008)
- Erreichung einer ausreichenden Randhärte (660-800 HV)
- Erreichung einer ausreichenden Kernhärte ( $>300$  HV)

Als Zieleinsatzhärtetiefe wird ein Wert von 1,2 mm definiert. Dies folgt der maximalen Einsatzhärtetiefenempfehlung für Verzahnungen bis zum Modul 5 (Pulsatorrad) inklusive zusätzlichem Aufmaß zur Hartfeinbearbeitung.

## **6.3 Bestimmung der Eigenschaften nach dem Laser-Strahlschmelzen und nach dem Einsatzhärten**

Zur Bewertung der Bauteilqualität nach dem Laser-Strahlschmelzen und zur Quantifizierung des Einflusses der Prozessgrößen werden die Mikrostruktur, die Härte, die statische Festigkeit im Zugversuch (Homogenität des Gefüges) und der Verzug am Cantilever analysiert. Zur Bewertung der Bauteilqualität nach dem Einsatzhärten und zur Identifikation von Wechselwirkungen werden die charakteristischen Merkmale des Härtetiefenverlaufs (Rand- und Kernhärte) und der Einsatzhärtetiefe (CHD) untersucht. Dazu wurde ein standardisierter Fertigungsauftrag entwickelt mit fünf Cantilevern, fünf Zugproben (liegend), fünf Würfeln für die Analyse der As-built-Eigenschaften und fünf Würfeln für die Analyse der Eigenschaften nach dem Einsatzhärten.

### **6.3.1 Einfluss der Art des Schutzgases**

Im industriellen Einsatz werden vornehmlich Argon und Stickstoff als Schutzgase im Laser-Strahlschmelzen verwendet (PAUZON 2021). In der Forschung sind Ansätze zur Nutzung von Helium oder Helium-Mischungen bekannt, werden im Folgenden auf Grund der geringen Verbreitung allerdings nicht betrachtet (PAUZON ET AL. 2020). Wie SCHEITLER ET AL. berichten, kann die Verarbeitung von Einsatzstählen in starker Abhängigkeit des Schutzgases stehen (SCHEITLER ET AL. 2016). Zu diesem Zweck wurde der Werkstoff 16MnCr5 bei konstantem Fertigungsparametersatz mit einer Schichtstärke von 30  $\mu\text{m}$  unter Argon und Stickstoff verarbeitet. Es zeigen sich geringe Unterschiede im entstehenden Gefüge (siehe Abbildung 51 a). Der lagenweise Aufbau unter Stickstoff führt zu einer Ausbildung von erhöhten Ferritanteilen. Folglich ist eine geringe Härtereduktion von 5 % zu erkennen. Die schnellere Abkühlung durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit von Stickstoff führt zu einem erhöhten Bauteilverzug von ca. 18 % (Verzug im Cantilever, Stickstoff: 1,63 mm, Argon: 1,38 mm). In der statischen Festigkeit im Zugversuch (Abbildung 51 d)) zeigt sich eine um 34  $\text{N/mm}^2$  erhöhte Zugfestigkeit, während Dehngrenze und Bruchdehnung nahezu unbeeinflusst bleiben.

## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

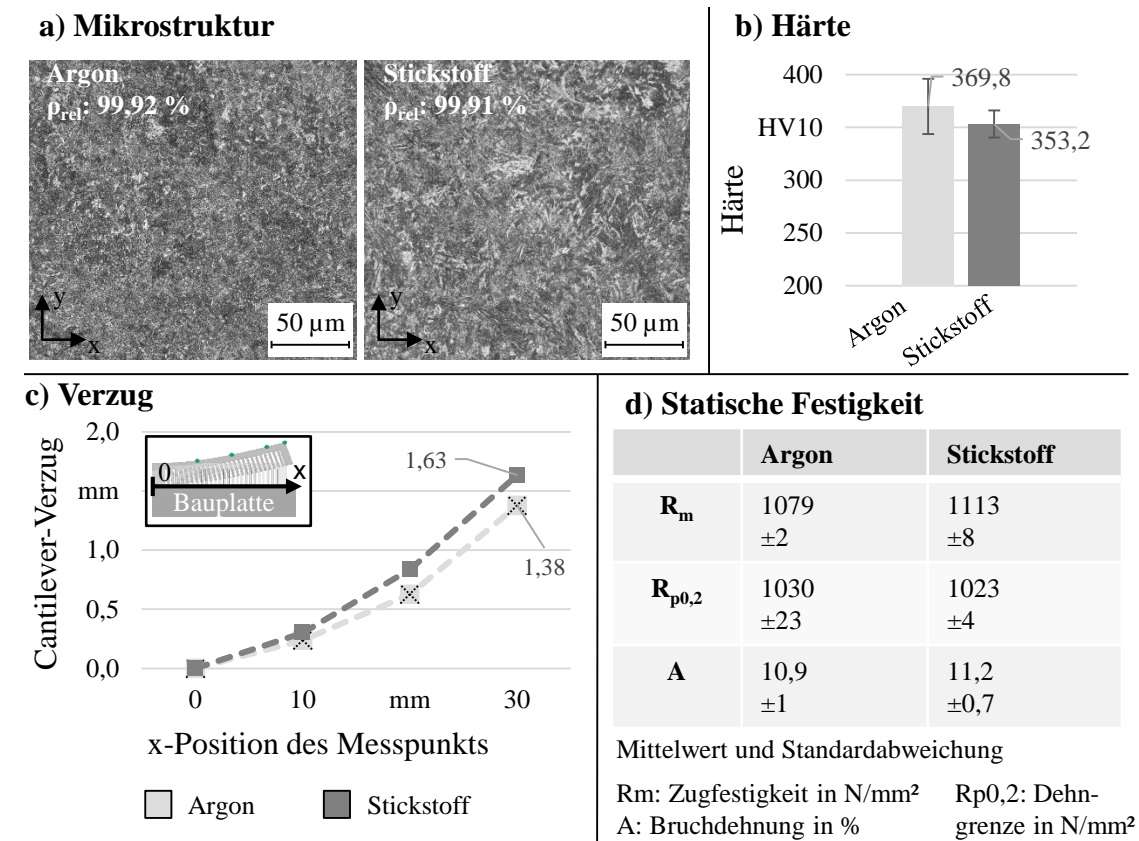


Abbildung 51: Einfluss der Schutzgase Argon und Stickstoff auf die Materialeigenschaften im As-built-Zustand

Die Verwendung von Stickstoff während des Bauprozesses führt sowohl zu einer vermehrten Anreicherung von Stickstoff im fertigen Bauteil als auch zur vermehrten Anreicherung von Sauerstoff (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Sauerstoff- und Stickstoffgehalt im Bauteil

Schutzgastyp	Argon	Stickstoff
Sauerstoffgehalt im Bauteil, ppm	125±10	395±11
Stickstoffgehalt im Bauteil, ppm	63±14	158±43

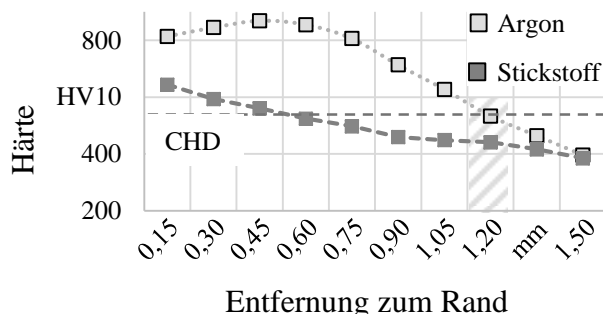
Es wird deutlich, dass unter Stickstoff mehr als drei Mal so viel Sauerstoff und mehr als doppelt so viel Stickstoff im Bauteil aufgenommen werden. Ähnliche Größenordnungen sind vom Stahl 17-4 PH (1.4548) bekannt (MEREDITH ET AL. 2018). Die Anreicherung von Stickstoff führt zu einem erhöhten Nickel-Äquivalent (BARGEL & SCHULZE 2018). Eine Änderung der Mikrostruktur wurde auf

## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

Basis des Schöffler-Diagramms nicht erwartet und konnte bis auf die geringe Zunahme der Ferritanteile auch nicht beobachtet werden. Der erhöhte Ferritanteil kann mit der Wirkung von Stickstoff als Austenitstabilisierer begründet werden. Eine Bildung von Nitriden ist nicht zu erkennen. Der Sauerstoffgehalt des Materials unter Stickstoff, wie auch unter Argon aufgebaut, liegt um den Faktor 5 bzw. 16 über dem Grenzwert der ISO 6336-5 für die Werkstoffklassen ME und MQ von 25 ppm.

Eine anschließende Einsatzhärtung zeigt, dass bei der Verwendung von Stickstoff als Schutzgas einerseits die Randhärte (810 zu 644 HV10) reduziert ist, andererseits die Einsatzhärtetiefe um mehr als 50 % verringert wird (siehe Abbildung 52).

**a) Härtetiefenverlauf**



**b) Abweichung Einsatzhärtetiefe**

	Argon	Stickstoff
mm	- 0,05 ✓	- 0,70 ✗

Ziel<sub>CHD</sub>: 1,20 ± 0,1 mm  
(Einsatzhärtetiefe) bei 550 HV10

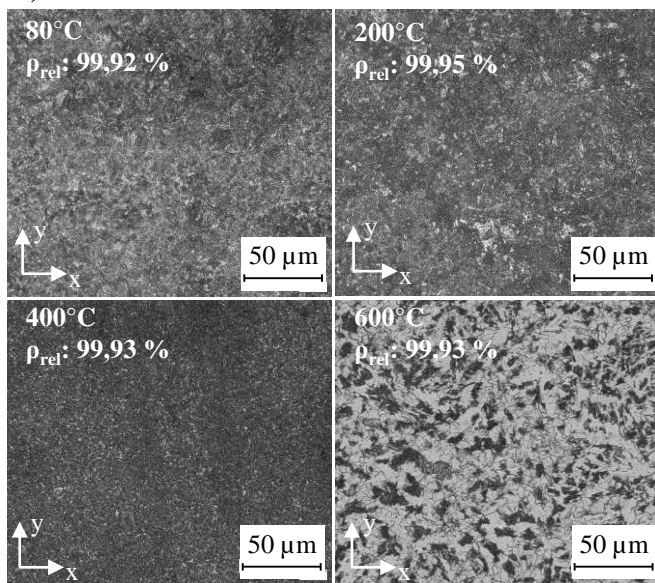
*Abbildung 52: Einfluss des Schutzgases auf die Materialeigenschaften nach dem Einsatzhärten*

Vergleichbare Wechselwirkungen mit einer Wärmebehandlung sind für den Werkstoff 17-4 PH bekannt (RAFIET AL. 2014). Ebenso ist es möglich, dass die interstiell löslichen Stickstoffatome die Diffusionsfähigkeit des Kohlenstoffs während des Aufkohlens verändern. Aus der Änderung der chemischen Zusammensetzung, durch die in Studien die Diffusionsfähigkeit des Einsatzstahls 18CrNiMo1-6 umgewandelt wurde, kann eine Verringerung der Einsatzhärtetiefe resultieren (GEGNER ET AL. 2012).

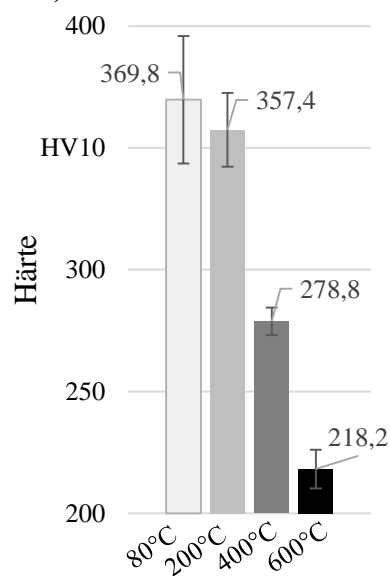
### 6.3.2 Einfluss der Bauplattentemperatur

Durch die Temperatur der Bauplatte kann einerseits der Verzug reduziert werden, andererseits wird das resultierende Gefüge stark beeinflusst (MUNSCH 2013). Für den Werkstoff 16MnCr5 ist der Einfluss der Bauplattentemperatur nicht erforscht. Gleichzeitig werden auf dem jetzigen Stand der Technik (vgl. Abschnitt 3.2) Einsatzstähle bei unterschiedlichen Temperaturen verarbeitet, ohne dass die Auswirkungen bekannt sind. Daher wurde der Werkstoff 16MnCr5 bei 80, 200, 400 und 600 °C Bauplattentemperatur verarbeitet. Abbildung 53 stellt die resultierenden Eigenschaften im gebauten Zustand dar.

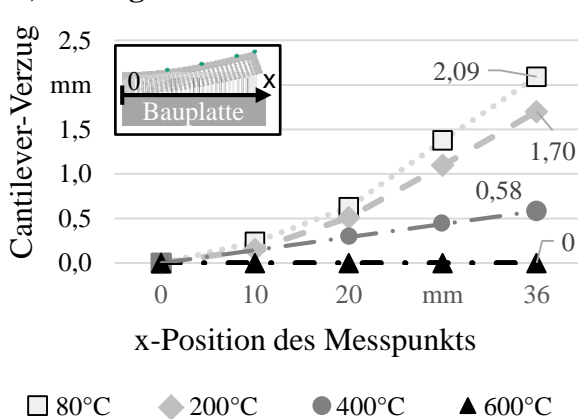
a) Mikrostruktur



b) Härte



c) Verzug



d) Statische Festigkeit

°C	80	200	400	600
$R_m$	1079 ±2	1024 ±6	672 ±50	514 ±27
$R_{p0,2}$	1030 ±23	1005 ±6	655 ±59	340 ±39
A	10,9 ±1	11,2 ±1	5,0 ±1	7,4 ±1,5

Mittelwert und Standardabweichung

$R_m$ : Zugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

$R_{p0,2}$ : Dehn-

A: Bruchdehnung in %

grenze in N/mm<sup>2</sup>

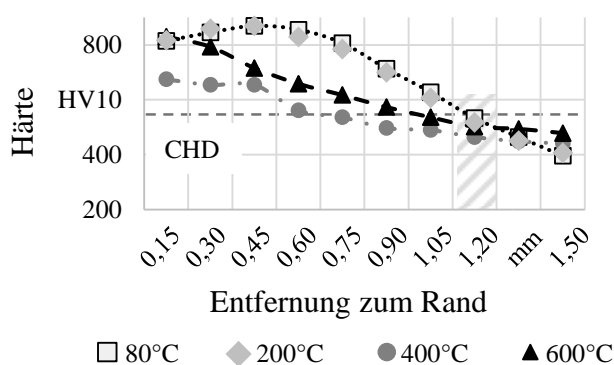
Abbildung 53: Einfluss der Bauplattentemperatur auf die Materialeigenschaften im As-built-Zustand

## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

Es wird deutlich, dass mit einer hohen Bauplattentemperatur eine Vergrößerung des Gefüges eintritt. Bei 600 °C Bauplattentemperatur liegt ein perlitisch-ferritisches Gefüge mit einer korrespondierenden Härte von 218 HV10 vor. Bei einer Bauplattentemperatur von 400 °C ist dagegen ein feinkörniges Gefüge in den Proben ersichtlich (INAYATHUALLA 2019). Trotz der Kornfeinung liegt die Härte bei 280 HV10 in einem deutlich geringeren Bereich. Eine Erhöhung der Bauplattentemperatur von 80 auf 200 °C hat dagegen nur einen geringen Einfluss auf die Härte. Allerdings wird der Verzug um ca. 20 % reduziert. Bei 400 °C Bauplattentemperatur liegt der Verzug nur noch bei ca. 25 % des ursprünglichen Werts von 80 °C. Wird die Bauplattentemperatur weiter auf 600 °C erhöht, was der Spannungsarmglühtemperatur entspricht, ist kein Bauteilverzug messbar. Die Anhebung der Bauplattentemperatur, wodurch der Temperaturgradient verringert wird, ist damit ein geeignetes Mittel, um den Verzug zu reduzieren. Der Effekt nimmt ab 400 °C Bauplattentemperatur stark zu. Die resultierende statische Festigkeit im Zugversuch verringert sich mit steigender Bauplattentemperatur. Die Zugfestigkeit sinkt von 1079 N/mm<sup>2</sup> um mehr als 50 % auf 514 N/mm<sup>2</sup> bei 600 °C Bauplattentemperatur. Die Dehngrenze sinkt in einem noch höheren Maße und bei 600 °C zeigt der Werkstoff 16MnCr5 erstmals einen Unterschied zwischen Zugfestigkeit und Dehngrenze.

Eine anschließende Einsatzhärtung zeigt, dass bei Bauplattentemperaturen von 400 und 600 °C die Randhärte und die resultierende Einsatzhärtetiefe deutlich abnehmen (siehe Abbildung 54, CHD Reduktion von 35 bzw. 15 %).

**a) Härtetiefenverlauf**



**b) Abweichung Einsatzhärtetiefe**

°C	80	200	400	600
mm	-0,05 ✓	-0,06 ✓	-0,5 ✗	-0,2 ✗

Ziel<sub>CHD</sub>: 1,20 ± 0,1 mm  
(Einsatzhärtetiefe) bei 550 HV10

Abbildung 54: Einfluss der Bauplattentemperatur auf die Materialeigenschaften nach dem Einsatzhärten



## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

Die erhöhten Bauplattentemperaturen wirken wie Vorwärmebehandlungen, die das Einsatzhärten beeinflussen (HIPPENSTIEL ET AL. 2002). Ein ähnliches Verhalten ist für das Nitrieren des laser-strahlgeschmolzenen Werkstoffs 1.2709 bekannt (FUNCH ET AL. 2022).

### 6.3.3 Einfluss der Scanstrategie

Häufig verwendete Scanstrategien sind die Streifen- und die Schachbrettbelichtung (vgl. Kapitel 2.4.1). Bisherige Untersuchungen für eine Titanlegierung ergeben ein Potenzial zur Verzugsreduktion beim Einsatz einer Schachbrettbelichtung (MUNSCH 2013). Für den Werkstoff 16MnCr5 zeigt sich sowohl ein gleichmäßiges Gefüge als auch eine Härtezunahme von 5 % beim Einsatz einer Schachbrettbelichtung (siehe Abbildung 55 a und b).

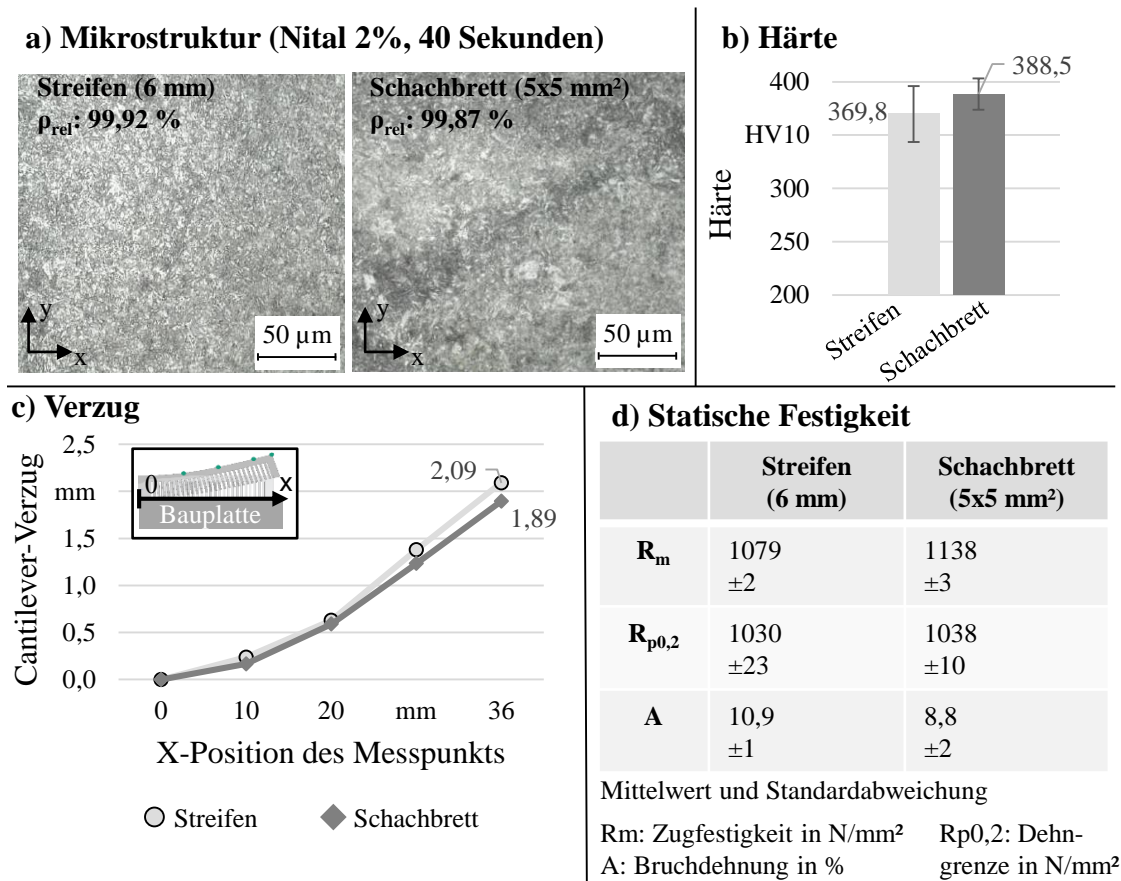


Abbildung 55: Einfluss der Scanstrategie auf die Materialeigenschaften im As-built-Zustand

Die Härtesteigerung kann über eine schnellere Abkühlung der einzelnen Schachbrettfelder erklärt werden, da diese in stochastischer Reihenfolge belichtet werden und sich keine größeren zusammenhängenden Flächen bilden. Ebenso führen die

## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

unterbrochene Belichtung und die reduzierte Scanvektorlänge zu einer Reduktion des Verzugs von 10 %. BRANNER zeigte simulativ und experimentell reduzierte Eigenspannungswerte und Verzüge in Bauteilen bei der Verwendung einer Schachbrettbelichtung für den hochfesten Werkzeugstahl 1.2709 (BRANNER 2010). Dies plausibilisiert die vorgestellten Ergebnisse für den Werkstoff 16MnCr5. In der statischen Festigkeit im Zugversuch zeigt sich ein festeres und spröderes Verhalten der Proben, die mittels einer Schachbrettbelichtung gefertigt wurden (BÖSELE 2020).

Eine anschließende Einsatzhärtung verdeutlicht, dass sowohl der Härtetiefenverlauf als auch die resultierende Einsatzhärtetiefe nicht von der Scanstrategie abhängen (vgl. Abbildung 56).

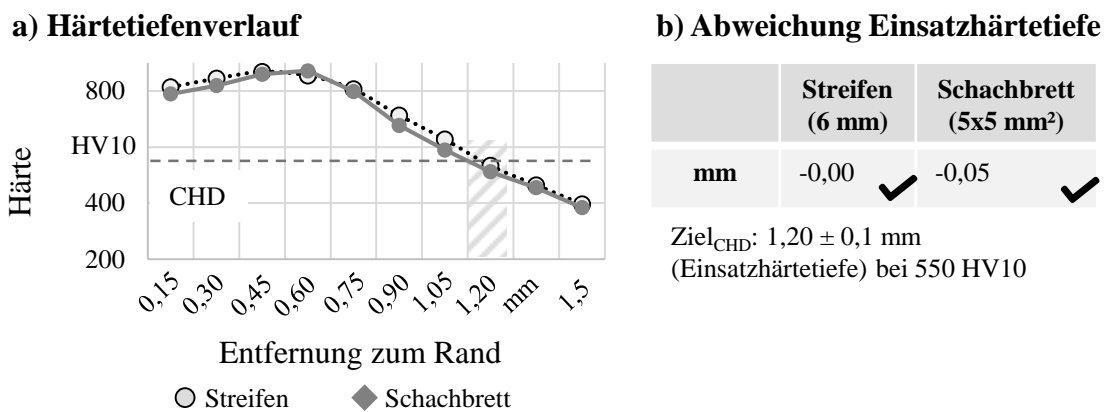


Abbildung 56: Einfluss der Scanstrategie auf die Materialeigenschaften nach dem Einsatzhärten

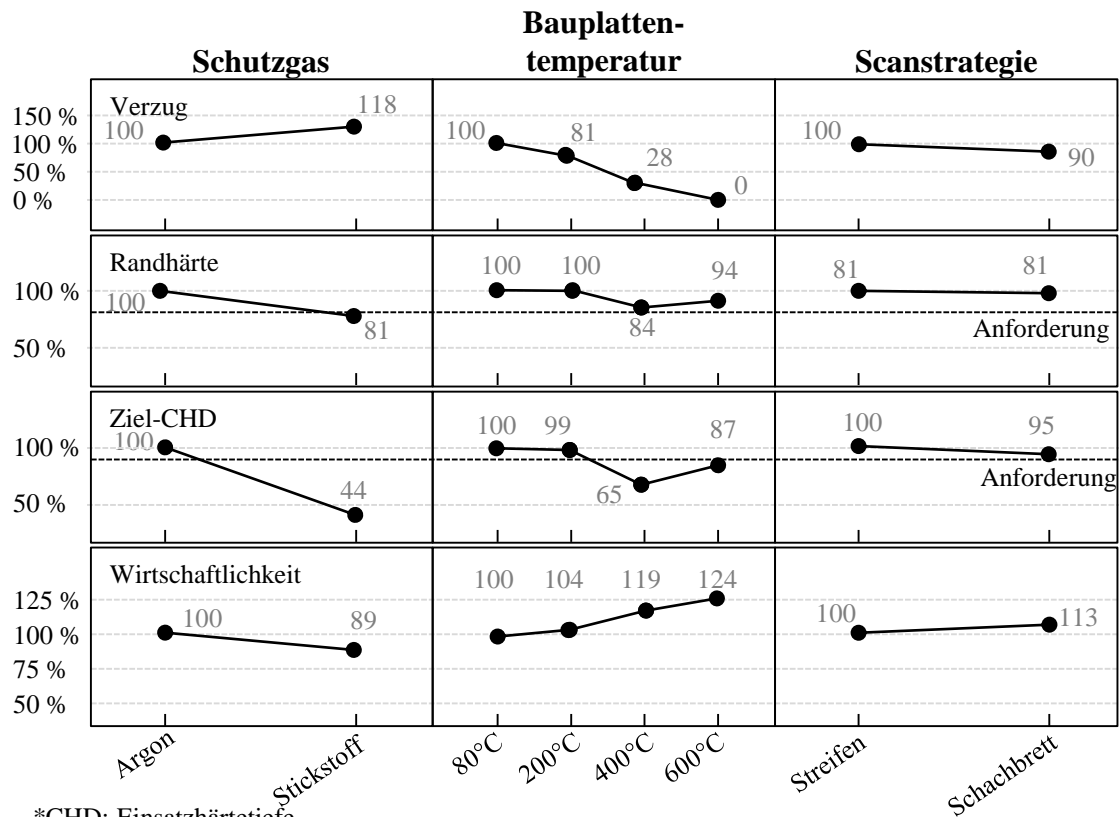
Die entstandenen Gefüge als Ausgangspunkt für die Wärmebehandlung sind dafür zu ähnlich. Des Weiteren tritt keine Änderung der chemischen Zusammensetzung wie bei der Variation des Schutzgases auf.

### 6.4 Quantifizierung der Wechselwirkungen und Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden werden die bisher vorgestellten Einflussfaktoren quantifiziert und die entstehenden wirtschaftlichen Auswirkungen bewertet. Dabei werden die Einflussfaktoren Schutzgas, Bauplattentemperatur und Scanstrategie betrachtet. Diese lassen sich anwendungs- und bauweisenspezifisch variieren. Als Bewertungskriterien werden das Gefüge im gebauten Zustand, der Verzug nach dem Laser-Strahlschmelzen, die resultierende Einsatzhärtetiefe, die Rand- und Kernhärte so-

## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

wie die Wirtschaftlichkeit angelegt. Letztere wird an Hand eines Referenzszenarios, der Fertigung von vier Verzahnungen (Bauzeit: 57 Stunden), berechnet (für detaillierte Informationen siehe SCHMITT ET AL. 2019a). Dabei werden die Einflussgrößen gegeneinander relativ bewertet. Abbildung 57 stellt eine Übersicht der Quantifizierung dar.



\*CHD: Einsatzhärte tiefe

Wirtschaftlichkeitsberechnung: Medienverbrauch nach LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018A,

Vergleich der Bauzeiten nach KAMPS ET AL. 2018, Referenzbauteile nach SCHMITT ET AL. 2019

Abbildung 57: Quantifizierung der Haupteffekte und der Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit

Es wird deutlich, dass eine Variation des Schutzgases mit erhöhtem Verzug und einer verringerten Einsatzhärte tiefe, aber mit einer Reduktion der Kosten um 11 % einhergeht. Eine schrittweise Erhöhung der Bauplatten-temperatur reduziert den Verzug, erhöht allerdings die Kosten durch verlängerte Aufheiz- und Abkühlphasen. Die Verzugsreduktion von 10 % beim Einsatz einer Schachbrettbelichtung ist nahezu proportional mit einer Kostensteigerung von 13 % verknüpft. Eine Superposition der Maßnahmen zur Verzugskompensation ist dabei vielversprechend (MUNSCH 2013).

Im Rahmen der Untersuchungen können alle Gefüge nach dem Laser-Strahlschmelzen als homogen angenommen werden. Ebenso wird die geforderte Kernhärte von 300 HV unter allen Einflussgrößen erreicht. Wird die Anforderung an die Ziel-CHD erfüllt, so wird auch die an die Randhärte eingehalten. Zulässige Kombinationen zur Erreichung der Anforderungen sind die Verwendung von Argon als Schutzgas, eine Bauplattentemperatur von 80 oder 200 °C und die Verwendung einer Streifen- oder Schachbrettbelichtung. Mit der Wahl der Vorheiztemperatur und der Scanstrategie können der Verzug sowie die Wirtschaftlichkeit eingestellt werden. Neben dem Parametersatz (Abschnitt 5) dient dies als Basis für die anwendungs- und bauweisenspezifische Prozess- und Prozesskettengestaltung. Zusätzlich kann die Wechselwirkung von Laser-Strahlschmelzen und Einsatzhärten bewertet werden. Es zeigt sich, dass dies bei der Änderung des Schutzgases und bei Bauplattentemperaturen von über 400 °C berücksichtigt werden muss.

## **6.5 Analyse der einsatzgehärteten Eigenschaften und Einordnung nach ISO 6336-5**

Im nächsten Schritt werden die Materialeigenschaften der unter Argon als Schutzgas bei 80 °C Bauplattentemperatur und mit einer Streifenbelichtung gefertigten Probekörper tiefergehend analysiert und mit den übergeordneten Materialanforderungen an Zahnräder aus der ISO 6336-5 verglichen.

Basierend auf den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts werden die Anforderungen an die Randhärte von 660 bis 800 HV mit einem Wert von 789 HV erfüllt, ebenso die an die Kernhärte von mindestens 300 HV (ME Klasse) mit einer Härte von 385 HV. Weitere Untersuchungen (siehe Tabelle 12) an der einsatzgehärteten Randschicht ergeben einen Oberflächenkohlenstoffgehalt von 0,9 % und einen Restaustenitgehalt von 27 % (MALLOW ET AL. 2021). Die Anforderungen der ME-Klasse werden erfüllt.

*Tabelle 12: Vergleich der einsatzgehärteten Eigenschaften des AM-Werkstoffs*

	<b>AM-Werkstoff</b>	<b>ME-Anforderung</b>
Oberflächenkohlenstoffgehalt	0,9 %	0,65–1,0 %
Restaustenitgehalt	27 %	< 30 %,
Kerbschlagarbeit im Kern	63±11 J	> 50 J

## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

Die Kerbschlagarbeit im Kern beträgt im Mittel 63 J und übersteigt damit die minimale geforderte Kerbschlagarbeit von 50 J. Die detaillierte Bewertung des Randgefüges zeigt, dass feiner nadeliger Martensit vorliegt. Es sind keine Karbide zu erkennen. Der Kernbereich besteht aus bainitischem Gefüge mit martensitischen Anteilen. Grobe Ferritblöcke sind nicht aufzufinden. Die Analyse der auftretenden Korngröße nach dem Einsatzhärten ergibt, dass ein Großteil der Körner den Korngrößenklassen 9–12 zuzuordnen ist. Dabei ist kein ausgeprägter Unterschied zwischen den Aufbaurichtungen zu erkennen. Es liegen keine Flächenanteile mit einer Korngrößenkennzahl unter fünf vor. Der laser-strahlgeschmolzene Werkstoff nach dem Einsatzhärten (Gasaufkohlen und Ölabschrecken) besitzt ein feineres Gefüge im Verhältnis zum konventionellen Werkstoff aus der gleichen Ofencharge (vergleiche Abbildung 58).

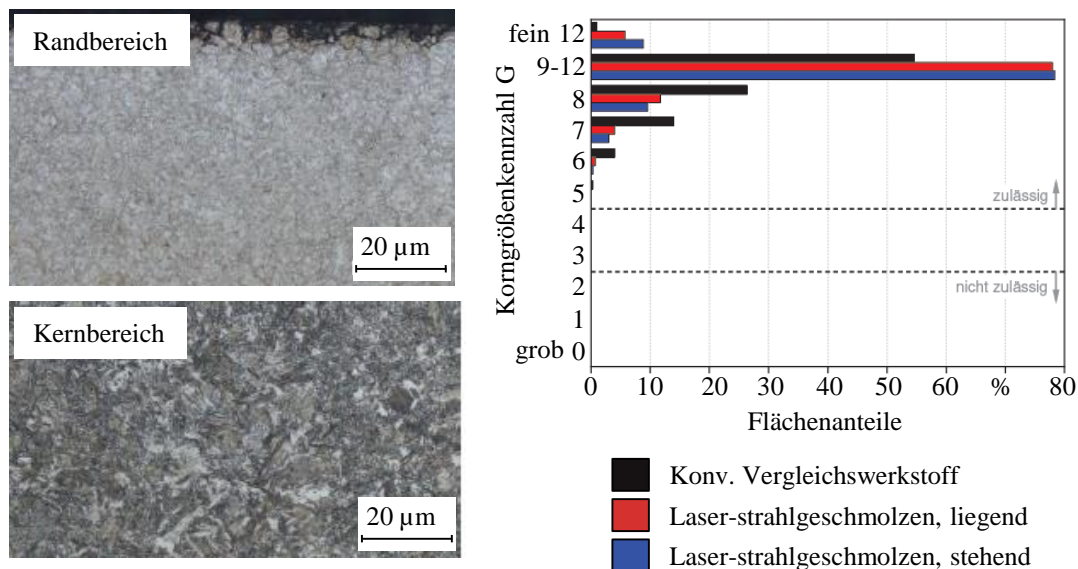


Abbildung 58: Rand- und Kernbereich sowie resultierende Korngröße des laser-strahlgeschmolzenen Werkstoffs (MALLOW ET AL. 2021)

Das resultierende Gefüge nach dem Einsatzhärten ist feinkörnig, martensitisch im Randbereich und bainitisch im Kern und die geforderten Härten werden jeweils erreicht. Insgesamt zeigt sich, dass der laser-strahlgeschmolzene Werkstoff die Anforderungen der ME-Klasse nach dem Einsatzhärten vollständig erfüllt (siehe Tabelle 13).

## Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette

Tabelle 13: Vergleich der Materialanforderungen aus ISO 6336-5 und den erzielten AM-Materialeigenschaften nach dem Einsatzhärten

Anforderung	ML	MQ	ME	AM-Material
Oberflächenhärte	600 HV ✓	660-800 HV ✓	660-800 HV ✓	789 HV
Kernhärte	243 HV ✓	266 HV ✓	300 HV ✓	385 HV
Oberflächenkohlenstoffgehalt	k. S. ✓	0,65-1,0 % ✓	0,65-1,0 % ✓	0,9 %
Mikrostruktur Randbereich	k. S. ✓	Martensit, feinnadelig ✓		Abbildung 58
Mikrostruktur Kernbereich	k. S. ✓	Martensit, nadelförmiger Ferrit und Bainit. Kein blockiger Ferrit ✓		Abbildung 58
Karbide	k. S. ✓	keine Netz- oder Knochenkarbide ✓	keine Netz- oder Knochenkarbide ✓	keine Netz- oder Knochenkarbide
Restaustenit	k. S. ✓	< 30 % ✓	< 30 %, fein verteilt ✓	27 %
Korngröße nach dem Einsatzhärten	k. S. ✓	Gefüge mit 90 % der Fläche mit Korngröße 5 oder feiner und maximal 3 % gröber als Korngröße 3 ✓		Abbildung 58
Kern-Schlagarbeit	k. S. ✓	k. S. ✓	50 J ✓	63 J

k. S.: keine Spezifikation

✓ Anforderung erfüllt

✗ Anforderung nicht erfüllt

## 6.6 Fazit

Es wurde eine Vorgehensweise aufgestellt, die die Identifikation von Wechselwirkungen entlang einer Prozesskette ermöglicht und die Auswahl anwendungsspezifischer Einflussgrößen im Laser-Strahlschmelzen ermöglicht. Am Beispiel des

## **Vorgehen zur Auswahl von Prozessgrößen und Identifikation von Wechselwirkungen in der Prozesskette**

---

Werkstoffs 16MnCr5 und einer Referenzprozesskette für Verzahnungen wurde die Methode angewandt. Die Referenzprozesskette wurde literaturbasiert erstellt, was vom Anwender ein Grundwissen sowohl im Laser-Strahlschmelzen als auch in der Anwendung voraussetzt. Die literaturbasierte Ermittlung der Einflussfaktoren erfordert Vorkenntnisse im Laser-Strahlschmelzen. Die Durchführung der Versuche und die Auswertung wurden durch standardisierte Prüf- und Messmethoden ermöglicht. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgte anwendungsorientiert an einem Fertigungsauftrag, wodurch greifbare Ergebnisse für die Anwenderin erzielt werden konnten; allerdings setzen diese ein Verständnis der Kostenmodelle für das Laser-Strahlschmelzen voraus.

Für den Werkstoff 16MnCr5 zeigt sich, dass die Art des verwendeten Schutzgases und die Bauplattentemperatur mit der erzielten Einsatzhärte auf Grund der Beeinflussung des Gefüges und der chemischen Zusammensetzung vor dem Einsatzhärteprozess in Wechselwirkung stehen. Größtes Potenzial zur Verzugsreduzierung hat ein Vorwärmen der Bauplattform auf 600 °C. Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Einflussfaktoren wird ersichtlich, dass alle vorgestellten Maßnahmen zur Verzugsreduktion die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflussen. Mit der dargestellten Quantifizierung ist es Anwendern möglich, für Bauteile und gegebene Rahmenbedingungen (Spannungsfeld Qualität, Zeit und Kosten) die Einflussfaktoren im Laser-Strahlschmelzen an Hand des Bauteilverzugs, der resultierenden Einsatzhärte und der Wirtschaftlichkeit auszuwählen. Bei der tieferen Untersuchung des Werkstoffzustands nach dem Einsatzhärten für eine ausgewählte Parameter- und Prozessgrößenkombination zeigt sich, dass die höchsten Anforderungen der ME-Klasse an das einsatzgehärtete Gefüge für Verzahnungen nach ISO 6336-5 für den Werkstoff 16MnCr5 erfüllt werden.

Das dargestellte Vorgehensmodell und die erzielten Ergebnisse für den Werkstoff 16MnCr5 lassen eine anwendungsorientierte Auswahl der Einflussfaktoren im Laser-Strahlschmelzen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen entlang der Prozesskette und der Wirtschaftlichkeit zu.

## 7 Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

In diesem Abschnitt werden systematisch die notwendigen Material- und Bauteileigenschaften abgeleitet, die zur Konstruktion und Auslegung von Verzahnungen für das Laser-Strahlschmelzen benötigt werden. Zuerst werden allgemeine Einflüsse aus dem Anlagensystem auf die relative Bauteildichte abgeleitet und darauf aufbauend wird der Einfluss von Störgrößen (Laserleistungsabweichung und Partikelgrößenverteilung) untersucht (vgl. Abbildung 59).

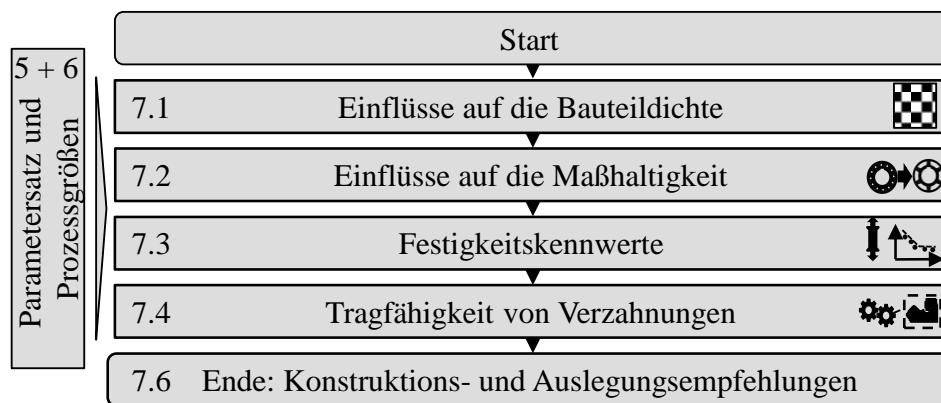


Abbildung 59: Vorgehen zur Ableitung von Konstruktions- und Auslegungsempfehlungen

Im nächsten Schritt wird der Bauteilverzug in Abhängigkeit von der Leichtbauweise analysiert und die Reproduzierbarkeit bei der Fertigung von über 80 Verzahnungen bestimmt. Danach werden Festigkeitskennwerte nach Norm in verschiedenen Oberflächenzuständen und Wärmebehandlungen ermittelt. Abschließend wird die Tragfähigkeit (statische Verspannung, Zahnflanke und Zahnfuß) von leichtbauoptimierten Verzahnungen experimentell erfasst und in die Materialklassen nach ISO 6336-5 überführt. Die Vorgehensweise ist dabei an VDI 2221 angelehnt und berücksichtigt zuerst grundlegende Material- und Fertigungsrestriktionen, die in späteren Schritten in eine Prozessfähigkeit sowie bauteilspezifische Eigenschaften (Verzug und Tragfähigkeit) überführt werden (VDI 2221-11).

Gemäß dem übergeordneten Ziel „*provide understanding and support*“ werden die Erkenntnisse in praxistaugliche Handlungsempfehlungen für die Fertigung, Konstruktion und Auslegung von AM-Verzahnungen für Konstrukteure und Produktionsingenieurinnen überführt (BLESSING & CHAKRABARTI 2009).



## 7.1 Einflüsse auf die Bauteildichte

Im ersten Schritt werden die Einflüsse auf die Bauteildichte ermittelt, die nicht dem Fertigungsparametersatz und den weiteren Maschinengrößen wie Schutzgas und Bauplattentemperatur zugeordnet werden können. Zunächst wird die Verteilung der erzielbaren relativen Dichte über die Bauplattform festgestellt. Dazu wurde die Bauplattform in 25 Quadrate zu je 50 mm Kantenlänge eingeteilt und in jedem Quadranten wurden fünf Würfel ( $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ) gefertigt. Die Dichtemessung erfolgte nach dem Archimedischen Prinzip und der Versuchsaufbau wurde zur statistischen Absicherung dreimal wiederholt. Zur Bewertung der Reproduzierbarkeit über verschiedene Fertigungsaufträge hinweg wurden vier Würfel als Fertigungsbegleitproben über zwölf standardisierte Fertigungsaufträge bei der Zahnradfertigung ausgewertet. Zusammengenommen wird damit die Reproduzierbarkeit der relativen Dichte sowohl innerhalb eines Fertigungsauftrags als auch über mehrere Fertigungsaufträge hinweg ermittelt.

Abbildung 60 zeigt, dass die Bauteildichte mit zunehmender Entfernung zum Schutzgaseinlass und in Beschichtungsrichtung abnimmt.

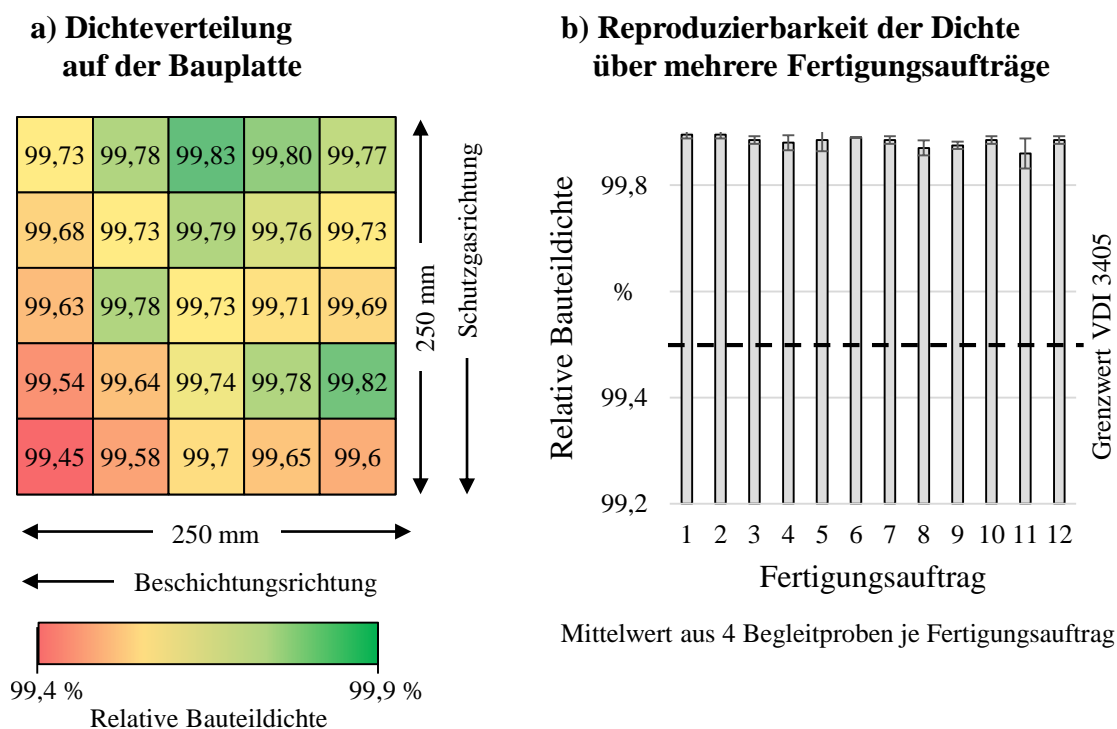


Abbildung 60: Reproduzierbarkeit der mechanischen Kennwerte (a) auf der Bauplattform und (b) über Fertigungsaufträge hinweg

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

Eine Unterschreitung des Zielwerts von 99,5 % relativer Dichte liegt nur im unteren Randbereich vor. Anhand von Beobachtungen kann dies der vermehrten Ablagerung von Prozessnebenprodukten wie Spratzern zugeschrieben werden. Eine Positionierung in diesem Bereich sollte für kritische Bauteile vermieden werden. Die Reproduzierbarkeit der relativen Dichte über zwölf Fertigungsaufträge zeigt, dass zu jeder Zeit der Mittelwert der vier ausgewerteten Proben über 99,8 % relative Dichte beträgt. Der Grenzwert von 99,5 % nach VDI 3405 wird in den Begleitproben in keinem Fertigungsauftrag unterschritten.

In weiteren Untersuchungen wird die Stabilität des Prozesses gegenüber äußeren Störgrößen bewertet. Abweichungen im Lasersystem und im Ausgangswerkstoff Pulver werden als wichtigste Einflussfaktoren betrachtet (OVER 2003, REHME 2009).

Durch die Verunreinigung des Laser-Einkoppelglases in der Baukammer kann es zu einer Reduktion der Laserleistung kommen (HAECKEL 2020). Mangelhaft durchgeführte Eingriffe wie falsche Laserlinearisierung können auch eine ungewollte Erhöhung der Laserleistung nach sich ziehen. Daher wird im folgenden Versuch die Laserleistung sowohl reduziert als auch erhöht. Die Grenzwerte basieren dabei auf Untersuchungen von HAECKEL 2020. Die verwendete Laserleistung von 200 W des 30  $\mu\text{m}$  Schichtstärken-Parametersatzes wurde um  $\pm 5, 10, 15$  und 20 % variiert um die Abweichungen zu simulieren. Jeweils fünf Probekörper ( $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ) wurden statistisch auf der Bauplatzform verteilt gefertigt und die relative Bauteildichte bestimmt. Im Ergebnis zeigt sich, dass Leistungsschwankungen von  $\pm 10 \%$  nur geringe Auswirkungen mit einer leicht verringerten relativen Dichte von 99,91 zu 99,68 % haben (vgl. Abbildung 61).

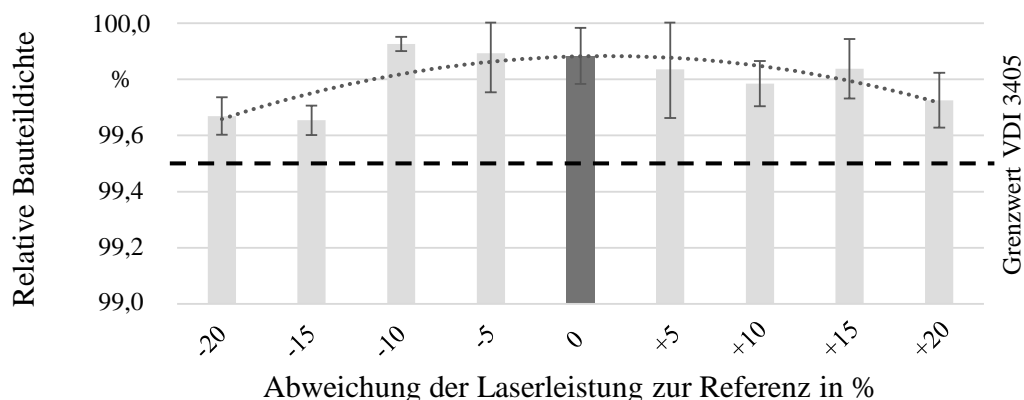


Abbildung 61: Vergleich der relativen Bauteildichte in Abhängigkeit von der Laserleistung des Ausgangsparametersatzes

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

Eine weitere Reduktion der Laserleistung um 15 bzw. 20 % verringert die Dichte auf 99,62 %. Insgesamt zeigt sich, dass für den Werkstoff 16MnCr5 ein breites und robustes Parameterfenster besteht, insbesondere im Vergleich zu Nickelbasislegierungen wie MAR247 (CARTER 2014), und Abweichungen von 10 % zum Referenzwert nur geringe Auswirkungen auf die relative Bauteildichte nach sich ziehen.

Als weiterer Schritt wird die Abhängigkeit der Fertigungsqualität von der Partikelgrößenverteilung des Werkstoffs 16MnCr5 geprüft. Der Zusammenhang zwischen den Pulvereigenschaften und der erzielten Bauteildichte konnte bereits für verschiedene Werkstoffe wie z. B. AlSi10Mg bestätigt werden (VOCK ET AL. 2019, LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2017). Zu diesem Zweck wurde Ausgangspulver der Charge 1 durch Siebung mit einer Maschenweite von 45  $\mu\text{m}$  in zwei Fraktionen (feines und grobes Siebgut) aufgeteilt. Die resultierende Partikelgrößenverteilung ist in Abbildung 62 (links) zu sehen.

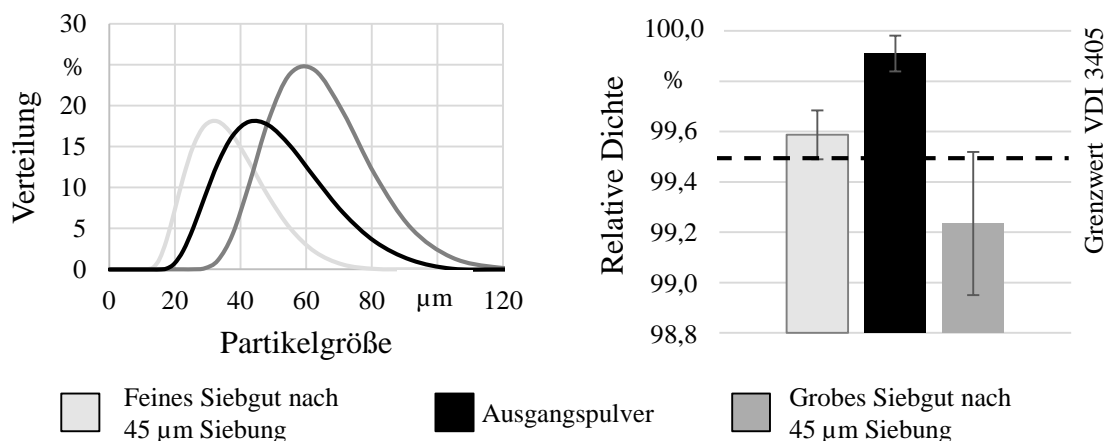


Abbildung 62: Vergleich der relativen Dichte in Abhängigkeit von der Partikelgrößenverteilung des Pulverwerkstoffs

Fertigungsaufträge mit dem feinen und groben Siebgut wurden unter Beibehaltung des ermittelten Parametersatzes für eine 30  $\mu\text{m}$  Schichtstärke gefertigt und die relative Dichte an Würfeln (10 x 10 x 10  $\text{mm}^3$ ) wurde ermittelt. In beiden Fraktionen ist eine Reduktion der relativen Bauteildichte zu sehen. Bei der Verwendung des feinen Siebguts verringert sich die relative Dichte von 99,91 auf 99,6 %. Eine Reduktion der relativen Bauteildichte auf 99,22 % ist bei der Verwendung des groben Siebguts zu beobachten. Die Grenze von 99,5 % Bauteildichte nach VDI 3405 Blatt 2 wird hierbei unterschritten. Die größeren Pulverpartikel benötigen für ein komplettes Aufschmelzen eine erhöhte Laserleistung und es bilden sich Lack-of-fusion-Poren. Die größeren Partikel führen ohne den Feinanteil zu einer Abnahme

der Pulverbettichte, wodurch dieser Effekt weiter verstärkt wirkt (RIENER ET AL. 2020).

Aus den Ergebnissen lässt sich der Schluss ziehen, dass bei der Wiederverwendung auf einen ausreichenden Feinanteil geachtet werden muss. Zusätzlich können die Ergebnisse als Grundlage genutzt werden, um das Modell zum Pulverrecycling von LUTTER-GÜNTHER anzuwenden (LUTTER-GÜNTHER 2020). Die beiden Untersuchungen können als Anhaltspunkte zum Aufbau einer qualitätsgesicherten Produktion genutzt und in Wartungsplänen, Anlagen- und Pulvereinkaufsspezifikationen sowie Empfehlungen für das Pulverrecycling festgehalten werden.

### 7.2 Einflüsse auf die Maßhaltigkeit

Nach der Ermittlung der Einflüsse auf die Bauteildichte wird der Betrachtungshorizont auf die Maßhaltigkeit in Abhängigkeit von der Bauplattenposition und einer Abfolge von Fertigungsaufträgen ausgeweitet. Zusätzlich wird der Einfluss der Leichtbaugeometrie der Bauteile auf ihre jeweilige Maßhaltigkeit bestimmt.

Zuerst wurde ein Probekörper ( $7 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ ) zur vereinfachten Auswertung auf der gesamten Bauplattform gebaut wie Abbildung 63 Teil a) und b) darstellen.

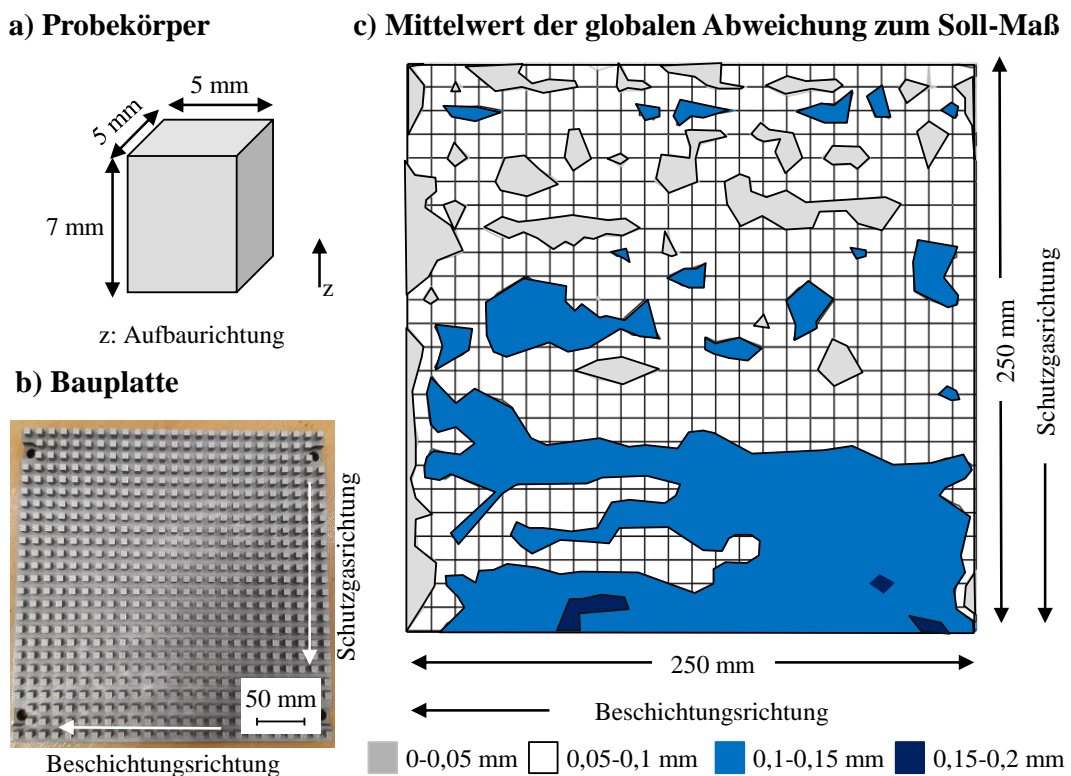


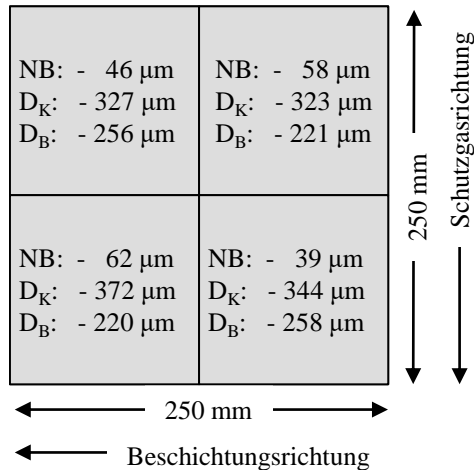
Abbildung 63: Absolute Maßabweichung in Abhängigkeit auf der Bauplattform

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

Es wurden 621 Probekörper regelmäßig auf der Bauplattform angeordnet. Der Versuch wurde zur statistischen Auswertung dreimal wiederholt. In der Auswertung liegen die Geometrieabweichungen in x- und y-Richtung in Größenordnungen von 0,05-0,2 mm. Probekörper, die in der Nähe des Schutzgaseinlasses gefertigt wurden, zeigen eine höhere Maßhaltigkeit als solche auf der schutzgasabgewandten Seite. Die Abweichungen betragen prozentual zwischen 1 % an der schutzgasnahen Seite und max. 4 % an der schutzgasabgewandten Seite der Bauplattform. Eine Abhängigkeit in Beschichtungsrichtung ist dagegen nicht festzustellen. Eine Einordnung nach den ISO-Grundtoleranzen (DIN EN ISO 286) ergibt einen Toleranzgrad von IT12 (SCHMITT ET AL. 2022).

Im folgendem Abschnitt werden Aussagen über die Maßhaltigkeit von Leichtbauverzahnungen getroffen, um unter anderem statistisch abgesicherte Informationen in den Auslegungsprozess (z. B. Aufmaßbestimmung) einfließen zu lassen. Im ersten Schritt werden Leichtbauverzahnungen aus drei Fertigungsaufträgen vermessen und ihren jeweiligen Positionen auf der Bauplattform zugeordnet (siehe Abbildung 64).

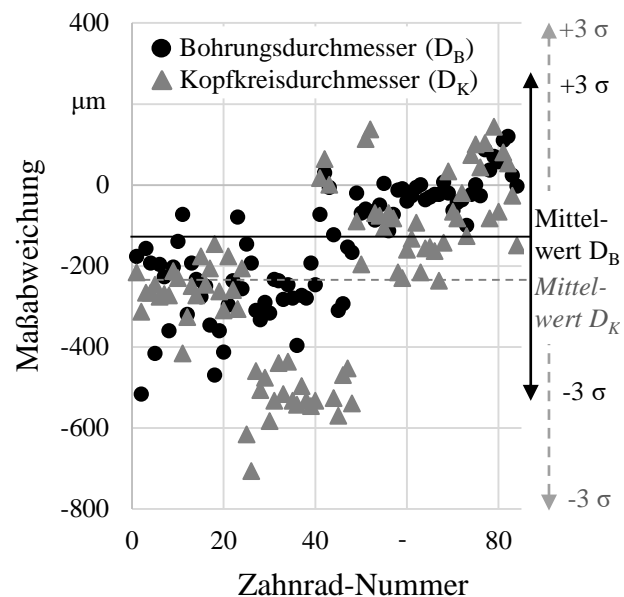
### a) Maßhaltigkeit auf der Bauplatte (As-built)



Mittelwerte der absoluten Abweichungen zum Sollmaß aus 3 Fertigungsaufträgen;

NB: Nutbreite, D<sub>K</sub>: Kopfkreisdurchmesser, D<sub>B</sub>: Bohrungsdurchmesser

### b) Reproduzierbarkeit der Maßhaltigkeit über mehrere Fertigungsaufträge (As-built)



3-fache Messung pro Zahnrad, Darstellung des Mittelwerts

Abbildung 64: Maßabweichungen auf der Bauplattform und über Fertigungsaufträge hinweg nach dem Spannungsarmglühen

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

---

Die vermessenen Verzahnungen (vier Verzahnungen pro Bauplatzform) haben ein Untermaß in der Nutbreite, im Bohrungsdurchmesser und im Kopfkreisdurchmesser. Zwischen den Quadranten der Bauplatzform ist nur ein sehr geringer Unterschied von maximal  $45\ \mu\text{m}$  zu messen (BIRKHOLZ 2021). Das ermittelte Untermaß im Bereich der Nutbreite ist als unkritisch für die Anwendung zu bewerten und das Untermaß in der Bohrung kann durch das abschließende Bohrungsschleifen (Hartfeinbearbeitung) ausgeglichen werden. Zur Kompensation des Untermaßes im Kopfkreisdurchmesser wird eine Skalierung von 0,5 % empfohlen. Die Vermessungsdaten von weiteren 80 Verzahnungen zeigen dagegen ein heterogenes Bild in der Reproduzierbarkeit. Die Abweichungen im Bohrungsdurchmesser betragen zwischen  $-450$  und  $+150\ \mu\text{m}$ . Die Maximal- und Minimalwerte des Kopfkreisdurchmessers liegen dagegen mehr als  $850\ \mu\text{m}$  auseinander, was für eine starke Schwankung in der Maßhaltigkeit spricht. Die ISO-Grundtoleranzen ergeben sich je Merkmal wie folgt:

- Nutbreite: IT 12
- Kopfkreisdurchmesser: IT 13
- Bohrungsdurchmesser: IT 13
- Zahnweite: IT 11.

Die Werte der ISO-Grundtoleranz liegen damit im Bereich der bereits ermittelten Werte für kleine Bauteile.

Nach dem Spannungsarmglühen und einer Weichbearbeitung wurden alle Verzahnungen einer Einsatzhärtung zur spezifischen Einstellung der Randschichthärte und der CHD unterzogen. Durch das Einsatzhärten, insbesondere durch die stattfindende Abschreckung im Ölbad, ergibt sich ein Verzug der Bauteile (CLAUSEN ET AL. 2009). Es wurden jeweils drei Verzahnungen mittels einer Koordinatenmessmaschine vor und nach dem Einsatzhärten vermessen. In der Nutbreite besteht im Mittel kein Unterschied, allerdings zeigen die Leichtbauverzahnungen eine starke Streuung von ca.  $\pm 40\ \mu\text{m}$ . Die Vermessungen der Zahnweite (über drei Zähne) und der Gesamtbreite der Verzahnung führten zu vergleichbaren Ergebnissen mit einer erhöhten Streuung der Leichtbauverzahnung. Im Bereich der Bohrung weisen die Leichtbauverzahnungen einen geringeren Verzug in positive Richtung auf. Dies deutet daraufhin, dass das verbliebene Material der Nabe eine Aufweitung durch eine radiale Stauchung der Leichtbaustruktur bewirkt. Im Gegensatz dazu ergibt sich eine negative Maßabweichung im Vollzahnrad. Die Bohrung wird durch die umliegende Masse gestaucht. Im Vergleich einer Typ-1-Vollver-

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

zahnung ohne Leichtbau und einer Leichtbauverzahnung Variante 3 (Masseeinsparung 44 %) zeigen sich im Verzugsverhalten abweichende Verhaltensmuster, wie in Abbildung 65 dargestellt wird.

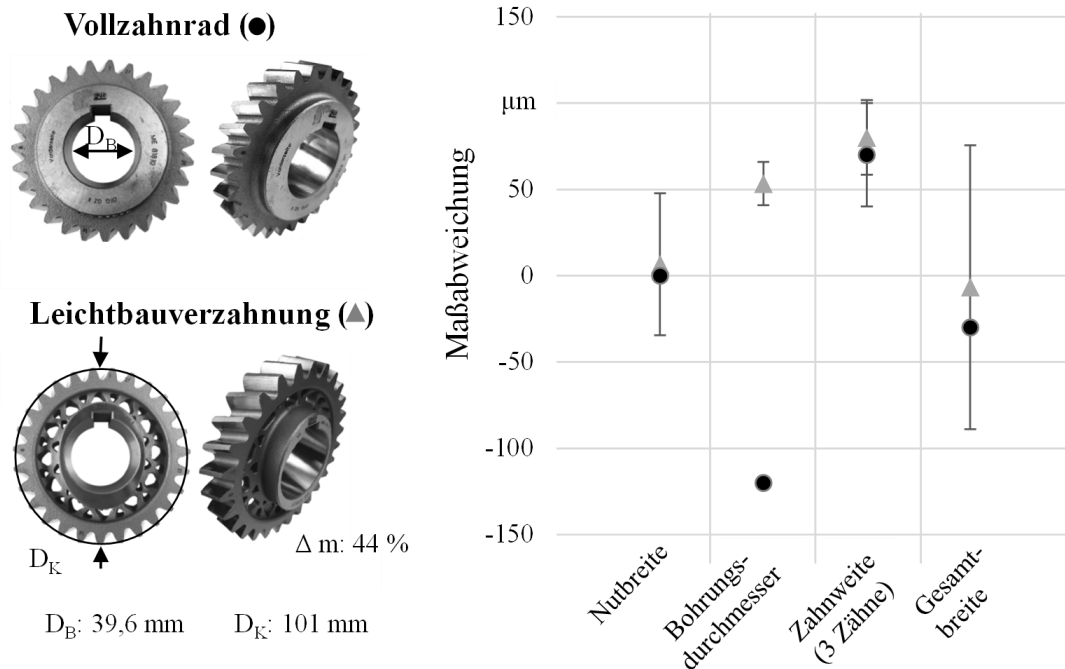


Abbildung 65: Verzug nach dem Einsatzhärten von Vollzahnrad und Leichtbauverzahnung

Die starken Schwankungen der Messwerte im Bereich der Gesamtbreite und der Zahnweite führen dazu, dass der Aufwand in der Nachbearbeitung insbesondere im Rüstvorgang steigt.

Um den Einfluss der Bauteilgeometrie auf das Verzugsverhalten detaillierter zu untersuchen, wurden Leichtbaudesigns auf Basis bionischer Konstruktionsprinzipien, Topologieoptimierung und Gitterstrukturen mit Masseeinsparungen von 17 bis 40 % entwickelt. Zur vereinfachten Fertigung und Auswertung wurden statt kompletten Verzahnungen nur Scheiben ohne Zähne gefertigt. Ohne die Masse der Zähne sind die prozentualen Masseeinsparungen ca. 15 % geringer als in Leichtbauverzahnungen zu erwarten. Die Scheibengrundkörper erlauben vergleichbare qualitative Beobachtungen und dienen als Standardvergleichselement im *Distortion Engineering* (BRINKSMEIER ET AL. 2011, SURMET AL. 2016). Die Maßabweichung im Bohrungsdurchmesser ist vom Leichtbaugrad und der daraus resultierenden Steifigkeit der Leichtbaustruktur abhängig (siehe Abbildung 66).

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

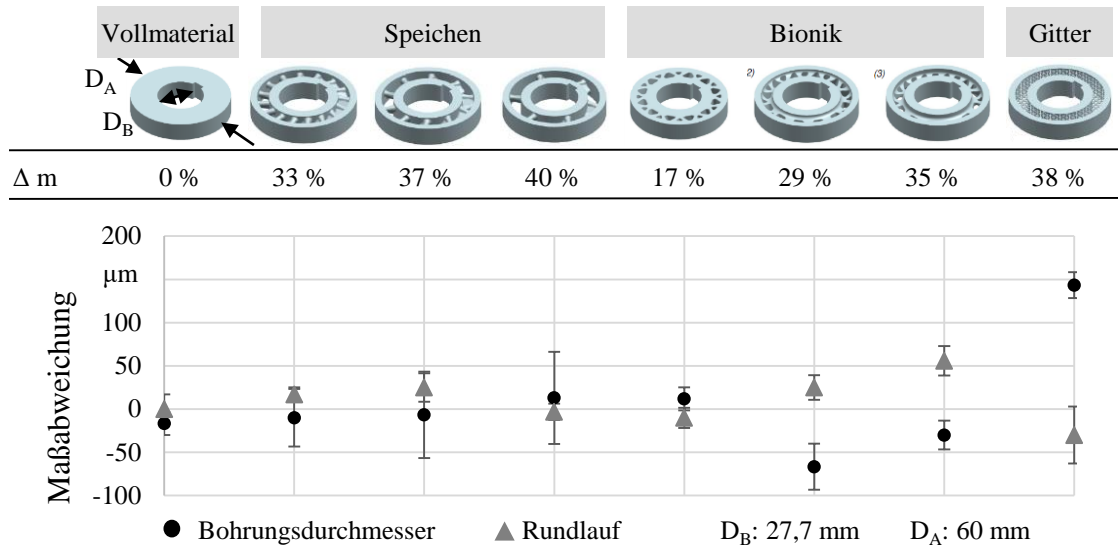


Abbildung 66: Verzug nach dem Einsatzhärten in Abhängigkeit von der Leichtbaustruktur

Die geringste Maßabweichung hat die Scheibe mit 17 % Masseeinsparung, während die höchste der Scheibe mit implementierten Gitterstrukturen zuzuordnen ist, die eine geringe Masse und Steifigkeit besitzt (FIEBER 2020). Als zweite Zielgröße wurde der Rundlauf der Scheiben gemessen. Dieser nimmt mit steigendem Leichtbaugrad ebenfalls ab. Zusätzlich ist zu erkennen, dass mit sinkender Speichenanzahl der topologieoptimierten Varianten (33, 37 und 40 % Masseeinsparung) die Standardabweichung zunimmt. Mit abnehmender Speichenzahl sinkt die Steifigkeit des Außenrings in radialer Richtung und lässt eine vermehrte Verformung beim Abschrecken im Einsatzhärteprozess zu. Ähnliche Effekte sind bei der verringerten Steifigkeit der verwendeten Gitterstruktur zu beobachten. In der Zusammenfassung der dargestellten Ergebnisse wird deutlich, dass mit steigendem Leichtbaugrad der Verzug zunimmt. Dabei spielt die Bauweise eine zentrale Rolle. Es sollte eine gleichmäßige radiale Anordnung der Leichtbaustruktur mit ausreichender Steifigkeit gewählt werden, um den Bauteilverzug zu minimieren.

Der vorangehende Abschnitt erlaubt eine Ergänzung des Aufmaßmodells von KAMPS über Informationen zur Maßhaltigkeit auf der Bauplattform und eine statistische Absicherung (KAMPS 2018). Die Anordnung auf der Bauplattform kann für die geprüften Verzahnungsgrößen vernachlässigt werden. Ergänzend kann bei Leichtbauverzahnungen mit einem verringerten Aufmaß in der Bohrung gearbeitet werden, da nach dem Einsatzhärten kaum Verzug auftritt. Die Leichtbaustruktur und die Verzahnungsgeometrie sollten neben dem spezifischen Schleifaufmaß auf den Zahnflanken von 0,3–0,4 mm eine Skalierung von 0,5 % erfahren, um dem verringerten Kopfkreisdurchmesser im As-built-Zustand entgegenzuwirken. Der



Einsatz von unregelmäßigen Leichtbaustrukturen oder Gittern mit geringer radialer Steifigkeit sollte vermieden werden, da durch das Einsatzhärten eine unregelmäßige Verformung auftritt.

### **7.3 Festigkeitskennwerte**

Ziel dieses Abschnitts ist es, die erreichbaren Festigkeitskennwerte des laserstrahlgeschmolzenen 16MnCr5 zu bestimmen. Zusammengenommen dienen die Ergebnisse als Grundlage für die Auslegung von Bauteilen, z. B. mittels Finiter Elemente-Methoden (FEM).

Zur rechnerischen Nachweisführung und zum Vergleich mit schmelzmetallurgisch hergestelltem 16MnCr5 wurden Zug-, Biege- und Druckproben entlang der Prozesskette entnommen und ausgewertet. Die Proben wurden in den Raumrichtungen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$  zur Bauplattform orientiert. Es wurden Rundproben mit einem Prüfdurchmesser von 5 mm verwendet und die Zugprüfung fand nach DIN EN ISO 6892-1 statt. Zusätzlich wurden verschiedene Oberflächenzustände (unbehandelt, chemisch poliert und zerspannt) untersucht, um eine Aussage in Abhängigkeit vom lokalen Bauteilzustand (z. B. zerspannte Funktionsfläche oder unbehandelte Freiformfläche) machen zu können.

Im As-built-Zustand besitzt der Werkstoff eine Zugfestigkeit von mehr als  $1000 \text{ N/mm}^2$  unabhängig vom Oberflächenzustand. Nach dem Spannungsarmglühen ist ein Abfall der Festigkeiten auf  $700 - 850 \text{ N/mm}^2$  in Abhängigkeit von der Oberfläche feststellbar. Im einsatzgehärten Zustand ist eine starke Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Oberflächenqualität zu erkennen. Die Zugfestigkeit im einsatzgehärteten und zerspannten Zustand beträgt  $926 \text{ N/mm}^2$ . Dies ist durch die harte und spröde Randschicht begründet, wodurch Oberflächendefekte zu Kerbwirkung führen und Spannungsspitzen nicht durch eine plastische Verformung abgebaut werden können. Eine Dehnung ist durch den spröden Zustand nicht zu ermitteln. Die Ergebnisse der stehenden Zugproben ( $90^\circ$  zur Bauplattform) sind in Abbildung 67 dargestellt.

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

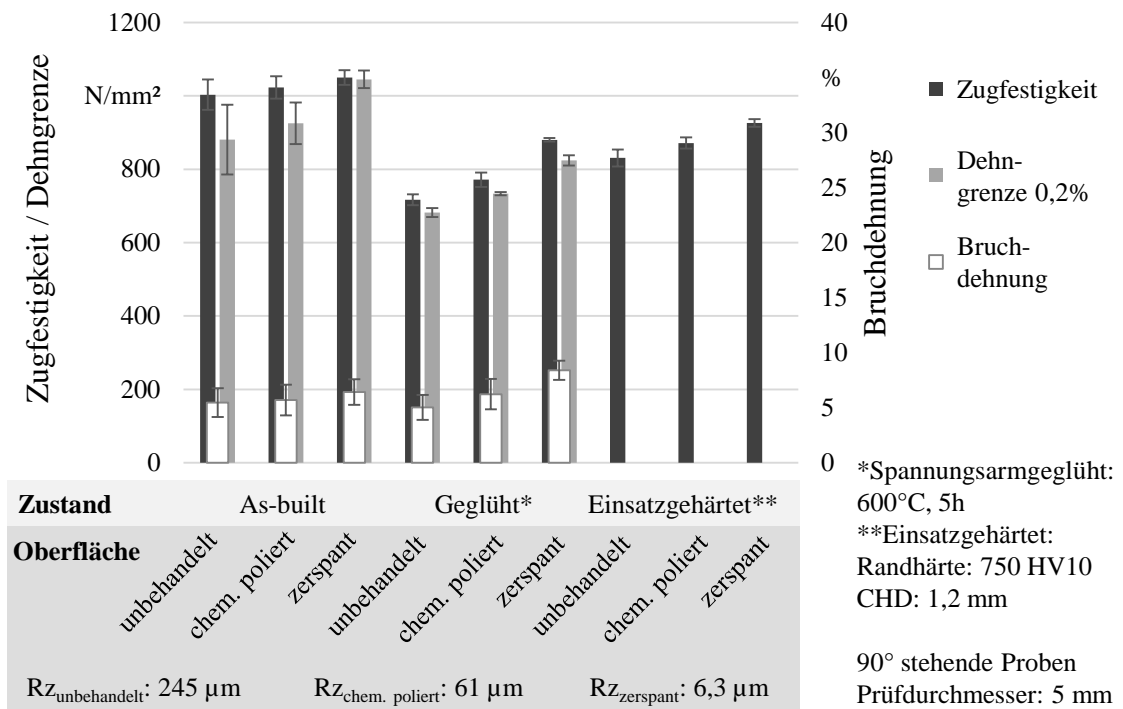


Abbildung 67: Kennwerte des Zugversuchs in verschiedenen Zuständen und Oberflächenqualitäten

Die Ergebnisse liegen im Bereich der ermittelten Werte von KAMPS 2018. Insbesondere die Werte im As-built-Zustand stimmen überein. Die in dieser Arbeit vorliegenden Proben haben eine gesteigerte Zugfestigkeit von ca. 150 N/mm<sup>2</sup> im spannungsarmgeglühten Zustand, obwohl vergleichbare Temperaturen und Haltezeiten (600 °C und 5 Stunden) verwendet wurden. Die Zugfestigkeit im einsatzgehärteten Zustand wurde im Gegensatz zur Umrechnung von Härtewerten direkt ermittelt und liegt ca. 70 N/mm<sup>2</sup> niedriger. Ursache ist die verringerte Oberflächenhärte der angelassenen Proben von 750 HV im Vergleich zu den Proben von KAMPS (830 HV). Während KAMPS vermehrte Brüche der Zugproben im oberen Prüfbereich beschreibt und dies auf eine Verschlechterung des Gefüges zurückführt, ist in den vorliegenden Versuchen eine gleichmäßige Verteilung der Einschnürungen mit mehrheitlichen Brüchen in der Probenmitte zu erkennen. Gründe können die verbesserte Anlagentechnik (z. B. Schutzgasströmung) und die Weiterentwicklung des Fertigungsparametersatzes sein. Der Oberflächenzustand zeigt bereits im statischen Belastungsfall einen ausgeprägten Einfluss auf die erzielbare Festigkeit.

Im Vergleich zu den Ergebnissen von WAWOCZNY & SCHNEIDER 2020 zum Werkstoff 20MnCr5 ergeben sich übereinstimmende Ergebnisse nach dem Einsatzhärten einer unbearbeiteten Oberfläche von 767 N/mm<sup>2</sup>. Im geschliffenen Zustand in

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

stehender Aufbaurichtung werden allerdings Zugfestigkeiten von  $1200 \text{ N/mm}^2$  im Vergleich zu  $926 \text{ N/mm}^2$  erzielt. Einerseits lagen bessere Oberflächeneigenschaften von  $Rz 3,9 \mu\text{m}$  vor, andererseits wurden ein Niederdruckgasaufkohlen mit einer Gasabschreckung sowie eine verringerte CHD von  $0,5 \text{ mm}$  und einer Oberflächenhärte von  $710 \text{ HV}$  durchgeführt. In Zusammenhang mit dem erhöhten Kernkohlenstoffgehalt und der größeren Kernhärte (ca.  $400 \text{ HV}$ ) ist die Steigerung der Zugfestigkeit plausibel.

Im Vergleich zu stehenden einsatzgehärteten Zugproben ( $926 \text{ N/mm}^2$ ) haben liegende Proben ( $0^\circ$  zur Bauplattform) eine erhöhte Zugfestigkeit von  $1137 \text{ N/mm}^2$  (siehe Abbildung 68).

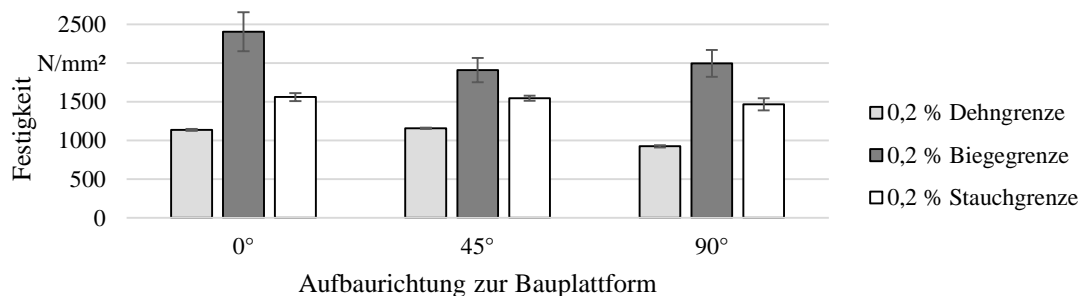


Abbildung 68: Festigkeiten im Zug-, Biege- und Druckversuch des Werkstoffs 16MnCr5 an zerspannten und einsatzgehärteten Proben

Im Biegeversuch ist eine starke Anisotropie der Eigenschaften zu erkennen, während die Eigenschaften im Druckversuch keine Anisotropie aufweisen. Bei einer Biegebelastung zeigt die Oberflächenqualität eine ebenso ausgeprägte Rolle wie im Zugversuch. Im Gegensatz dazu haben Oberfläche und Aufbauwinkel nur geringen Einfluss auf die Druckfestigkeit (siehe Anhang Abbildung 98 und 95).

Eine Anisotropie der Festigkeitskennwerte ist nach dem Einsatzhärten erkennbar. Dies steht im Widerspruch zu KAMPS 2018, der keine Anisotropie nach dem Spannungsarmglühen feststellt, wird aber durch WAWOCZNY & SCHNEIDER 2020 für den Werkstoff 20MnCr5 nach dem Einsatzhärten ebenfalls ausgewiesen. Eine liegende Orientierung der Verzahnung auf der Bauplattform ermöglicht es, die Belastung der Zähne und der Leichtbaustruktur (Zug-Druck-Belastung) in Richtung der höchsten Beanspruchbarkeit zu legen.

Das Laser-Strahlschmelzen ermöglicht die Herstellung von Gitterstrukturen und Streben geringen Querschnitts (GEBHARDT 2016). Diese eignen sich zur Umsetzung von Leichtbaustrukturen; eine Auslegung wird allerdings durch größenbedingte Effekte in mesoskopischen Strukturen erschwert (siehe Abschnitt 3.3.1).

Daher wurden im nächsten Schritt Zugproben (Rund- und Flachzugproben) mit verringertem nominellen Durchmesser bzw. Querschnitt (0,5 - 5 mm) **abweichend** von DIN 50125 in stehender Aufbauichtung (90°, als geringster Wert der Festigkeit) hergestellt und mit as-built Oberflächenrauheit geprüft (siehe Abbildung 69). Die nominelle Fläche wird mittels des nominellen Durchmessers bzw. Querschnitts aus den CAD-Daten berechnet. Abweichungen aus dem Herstellungsprozess und die tatsächliche Oberflächenrauheit bleiben unberücksichtigt.

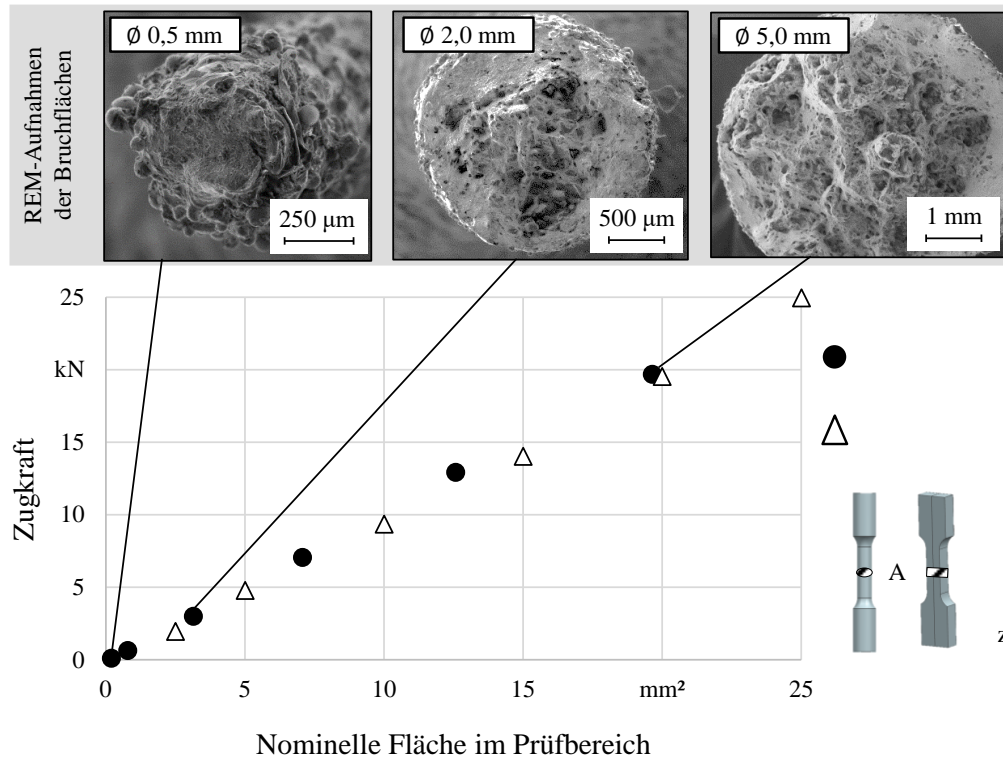


Abbildung 69: Zusammenhang zwischen ertragbarer Zugkraft und nomineller Fläche von as-built Proben (Überlagerung von Rauheits- und Größeneinfluss)

Es zeigt sich für beide Probentypen eine nahezu lineare Abnahme der Zugkraft bei sinkendem Probendurchmesser. Auf eine Berechnung der Zugfestigkeit wird verzichtet, da die tragende Querschnittsfläche, gerade bei kleineren Probendurchmessern, durch die bestehende Rauheit der as-built Oberfläche, nicht einwandfrei bestimmt werden kann. Es liegt eine Überlagerung der Einflüsse der Oberflächenrauheit und der Größe der Probe vor, welche nicht voneinander getrennt betrachtet werden können. Dennoch sind die Ergebnisse für Anwender in der Gestaltung von Bauteilen wertvoll, da in additiv gefertigten Bauteilen oft nur Passflächen nachbearbeitet werden und lasttragende Streben oder Gitter in Leichtbauanwendungen keine Bearbeitung der Oberfläche erfahren. Die Abweichung in der relativen Bau-

teildichte der Proben ist gering (99,4 bis 99,8 % relative Dichte). In den Aufnahmen der Bruchflächen ist erkennbar, dass das Verhältnis von Pulveragglomeraten an der Oberfläche und Querschnittsfläche mit zunehmendem Probendurchmesser abnimmt (GERSTL 2021).

### 7.4 Prüfung von AM-Verzahnungen

Nachdem in den vorherigen Abschnitten allgemeine Festigkeitskennwerte und verzahnungsbezogene Auslegungskriterien aufgestellt wurden, wird in diesem Abschnitt die Tragfähigkeit von laser-strahlgeschmolzenen Verzahnungen mit und ohne Leichtbaustruktur ermittelt. Die Tragfähigkeit setzt sich aus statischer Belastbarkeit, Zahnflanken- und Zahnfußtragfähigkeit zusammen.

Im ersten Schritt wird die relative Dichte ( $\rho_{\text{rel}}$ ) der Verzahnungen durch zusammengesetzte Schlibbilder ermittelt, da eine bestehende Restporosität die erzielbare Festigkeit bei dynamischer Belastung stark herabsetzt (YADOLLAHI & SHAMSAEI 2017). Abbildung 70 zeigt exemplarisch ungeätzte Schlibbe mit Übersichts- und Detailaufnahmen von vier Ritzeln der Prüfverzahnung Typ-1 nach Durchlaufen der Prozesskette bei einer relativen Dichte von  $\rho_{\text{rel}}$  von über 99,7 %.

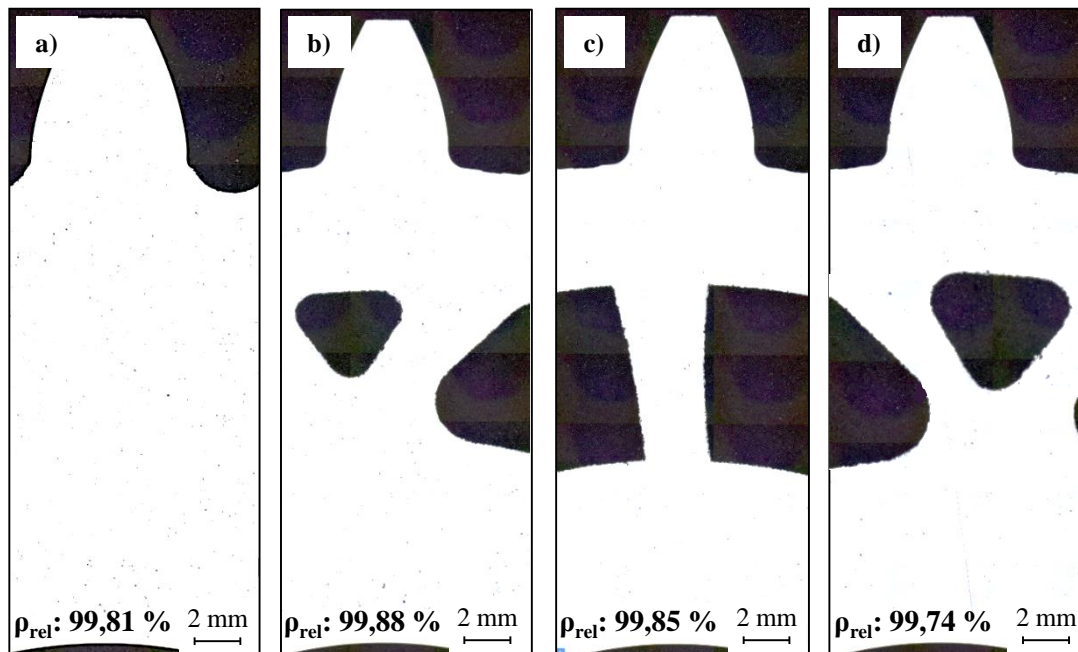


Abbildung 70: Querschliffe der AM-Verzahnungen a) Vollmaterial b) Leichtbauvariante 1 ( $\Delta m$ : -30 %) c) Leichtbauvariante 2 ( $\Delta m$ : -35 %) d) Leichtbauvariante 3, erkennbar an dünneren Stegen ( $\Delta m$ : -44%);

Zur besseren Erkennung der Poren und Reduzierungen von leichten Unregelmäßigkeiten in den zusammengesetzten Mikroskopaufnahmen („Stitching“) wurde die Helligkeit der Aufnahmen erhöht und der Kontrast angepasst.

Die Fertigung dieser vier Prüfverzahnungen mit hohen relativen Dichten auf einer Bauplattform ist ohne gegenseitige Beeinflussung, z. B. durch den Schutzgasstrom, möglich und bestätigt die Untersuchungen zur Dichteverteilung auf der Bauplattform (vgl. Abbildung 60).

Grundsätzlich liegen eine gleichmäßige Einsatzhärtung sowie ein Gefüge vor, das mit schmelzmetallurgisch erzeugten Gefügen vergleichbar ist. Die Kernhärte in den Leichtbaustrukturen liegt im Bereich von 400 HV, was mit einer schnelleren Abkühlrate beim Härten durch weniger Masse begründet werden kann. Eine Durchhärtung erfolgte nicht (siehe Abbildung 71).

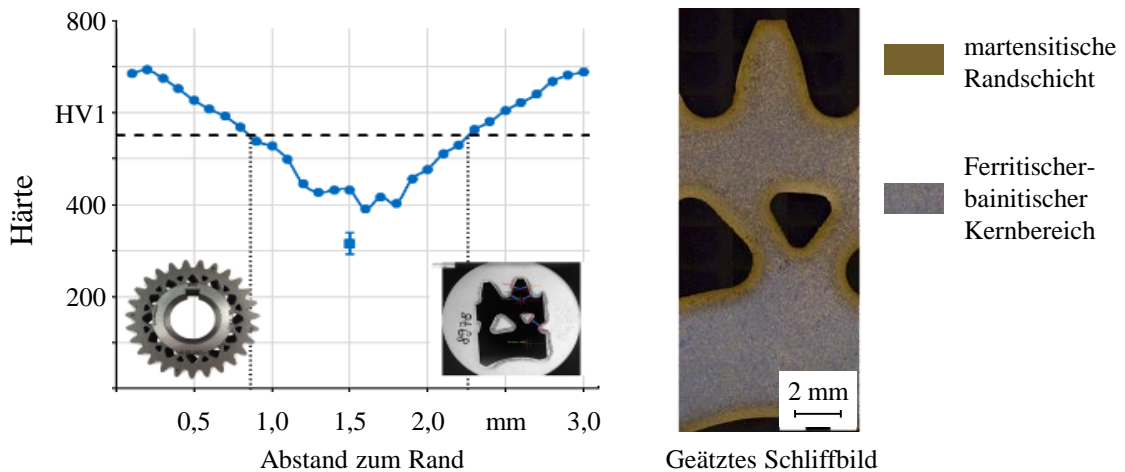


Abbildung 71: Härteverlauf in einer Leichtbaustrebe (Leichtbauvariante 1) und zugehöriges geätztes Schlibbild (2 % Nital)(WINKLER ET AL. 2022)

Die Einsatzhärte in diesem Ausschnitt der Leichtbaustrebe beträgt 0,85 mm. Damit wird die geforderte Einsatzhärte von 0,9 mm in der Leichtbaustrebe im Rahmen der Toleranz von  $\pm 0,1$  des Einsatzhärtens (siehe TRUTE 2008) erreicht. Weitere Messungen im Zahnfuß und in der Zahnflanke bestätigen die Erreichung der Zeichnungsvorgaben. Durch die durchgeführte Skalierung zur Kompensation der Bauteilschrumpfung aus Abschnitt 7.2 wurde die Einsatzhärte erreicht und auch die Maßabweichungen ausgeglichen. Eine zusätzliche Schwierigkeit in der Einsatzhärtevermessung ergibt sich durch die raue Oberfläche der additiv gefertigten Bauteile im Vergleich zu spanend hergestellten Oberflächen mit definiertem Rand. In den durchgeführten Messungen wurden der Start der Oberfläche über die „Täler“ der AM Oberfläche definiert. Dadurch sind die dargestellten Messwerte

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

als konservativ anzusehen, da die Rauigkeit von ca.  $10\ \mu\text{m}$  der Einsatzhärte tiefe hinzugerechnet werden könnte. Die Analyse der Mikrostruktur ergab, dass keine Randoxidation vorlag und es wurden keine Oberflächenrisse bei einer Farbeindringprüfung festgestellt.

Die eingesetzten Prüfstände zur Ermittlung der Tragfähigkeit sind Pulsatoren und FZG-Zahnradverspannungsprüfstände. Die Prüfstände sowie die Versuchsdurchführung sind erprobt, standardisiert und werden an der FZG (Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme) der TU München durchgeführt (BERGMANN ET AL. 1999, DIN ISO 14635-1, LEONHARDT ET AL. 2020). Für die Ermittlung der statischen Gestaltfestigkeit und der Zahnflankentragfähigkeit wurde eine Typ-1-Prüfverzahnung eingesetzt. Detaillierte Verzahnungsdaten sind in Tabelle 24 des Anhangs hinterlegt.

Die statische Gestaltfestigkeit der Prüfverzahnung Typ-1 mit verschiedenen Leichtbaunaben wurde mit Hilfe eines statischen Verspannungsprüfstands untersucht. Ritzel und Rad wurden statisch mit einem maximalen Prüfmoment von  $T_{\text{Prüf,max}} = 1200\ \text{Nm}$  verspannt, es wurde das Drehmoment über die Zeit erfasst (BRUMMER 2021). Die Messergebnisse der statischen Gestaltfestigkeit sind in Abbildung 72 dargestellt.

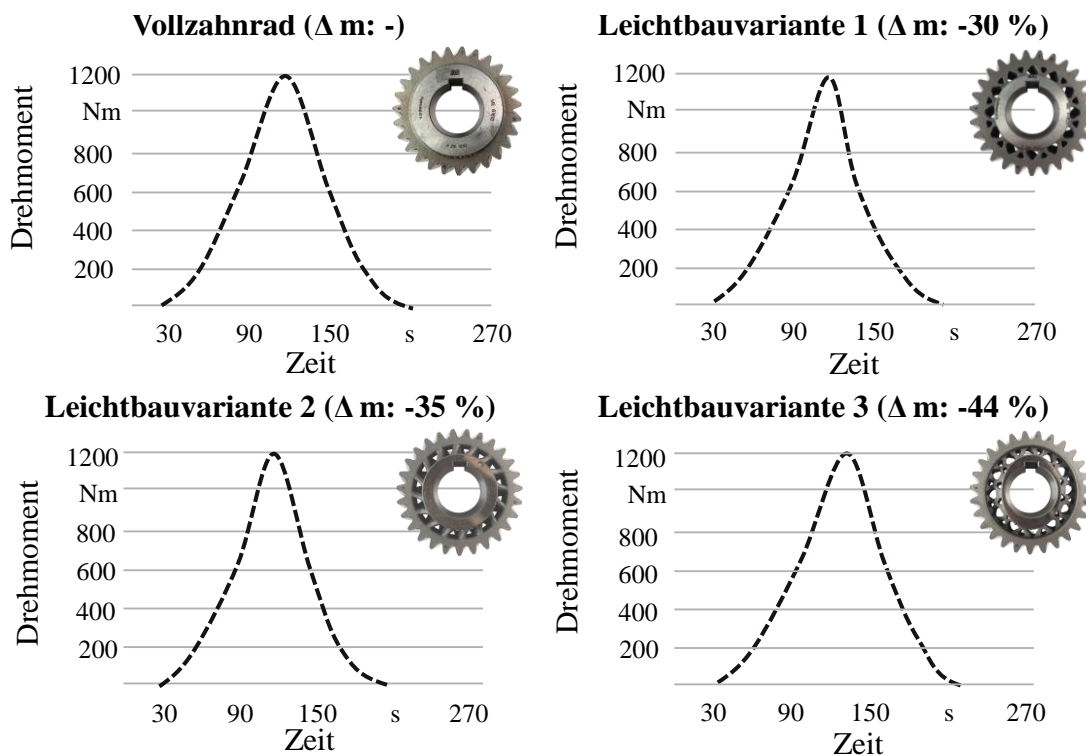


Abbildung 72: Statische Gestaltfestigkeit der Prüfverzahnungen; gemittelte Drehmomentkurven aus drei Versuchsdurchführungen

Alle Verzahnungen zeigen vergleichbare dynamischen Festigkeitskennwerte auf. Geringe Abweichungen in den Drehmomentkurven wurden durch die Belastung des Prüfstands an die Auslegungsgrenze von 1200 Nm und geringen Steifigkeiten von Hilfselementen wie Wellen, Kupplungen und Lager verursacht. Alle Prüfräder zeigen ein elastisches Verhalten. In einer Vermessung vor und nach der statischen Belastung konnten keine Abweichungen ermittelt werden. Die Prüfverzahnungen mit Leichtbaustruktur weisen vergleichbare Gestaltfestigkeiten wie solche in einer Vollmaterial-Ausführung auf. Bei den Leichtbaustrukturen mit Durchmessern von mindestens 3 mm sind keine Verformungen oder Risse bis zur maximalen Prüfstandsbelastung von 1200 Nm erkennbar. Die Leichtbauverzahnungen haben bessere statische Tragfähigkeiten als Leichtbauvarianten durch Umformen aus der Initiative „Massiver Leichtbau“ (LEONHARDT ET AL. 2020). Bei einer Masseinsparung von 30 % kann das übertragene Drehmoment mindestens um den Faktor 1,5 und bei einer Masseinsparung von 44 % um mindestens den Faktor 2,7 durch das Laser-Strahlschmelzen erhöht werden.

Die dynamische Zahnfußtragfähigkeit der Prüfverzahnung Pulsatorrad mit einer Leichtbauvariante 3 wurde mit Hilfe von Pulsatorprüfständen untersucht (Prüfstand siehe Anhang Abbildung 101). Im Pulsator wurden die Verzahnungen durch planparallele Spannbacken über vier Zähne eingespannt. Über einen Resonator und Prüfaufnehmer wurde eine schwellende Last (sinusförmig und konstante Schwingbreite) an die Verzahnung geleitet. Die Prüfung erfolgte bei einer Prüffrequenz von 90 bis 120 Hz. Die Versuchsdurchführung und -auswertung verliefen nach der BERGMANN ET AL. 1999, FVA-Richtlinie 563/I zur Vereinheitlichung von Tragfähigkeitsuntersuchungen. Die Verzahnungen haben die Prozesskette bis nach dem Einsatzhärten durchlaufen. Ein Schleifen des Zahnfußes ist nicht erfolgt, wie es in der industrietypischen Prozesskette für schmelzmetallurgische Verzahnungen der Fall ist. Nach dem Reinigungsstrahlen ergab sich eine Rauheit in der Zahnfußrundung von Rz 55–63  $\mu\text{m}$ . Schmelzmetallurgisch hergestellte Prüfzahnräder nach einer spanenden Herstellung des Rohlings haben eine deutlich niedrigere Rauheit in der Zahnfußrundung von Rz 4,7–15  $\mu\text{m}$  (STENICO 2007).

Die Prüfung erfolgte nach dem Treppenstufenverfahren (NIEMANN & WINTER 2003). Ein Versuchspunkt wurde entweder als Durchläufer beim Erreichen der definierten Grenzlastspielzahl ( $6 \times 10^6$  Lastspiele) gezählt oder als Bruch, falls vor Erreichen der Grenzlastspielzahl ein Zahnfußbruch auftrat (NIEMANN & WINTER 2003, FVA-Richtlinie 563/I). Bei einem Durchläufer wurde im nächsten Versuch das Lastniveau (Pulsatornormalkraft) erhöht, bei einem Bruch verringert. Die



## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

Ergebnisse der resultierenden Wöhlerlinien der Zahnfußtragfähigkeit, abgeleitet aus den Pulsatorversuchen, sind in Abbildung 73 dargestellt.

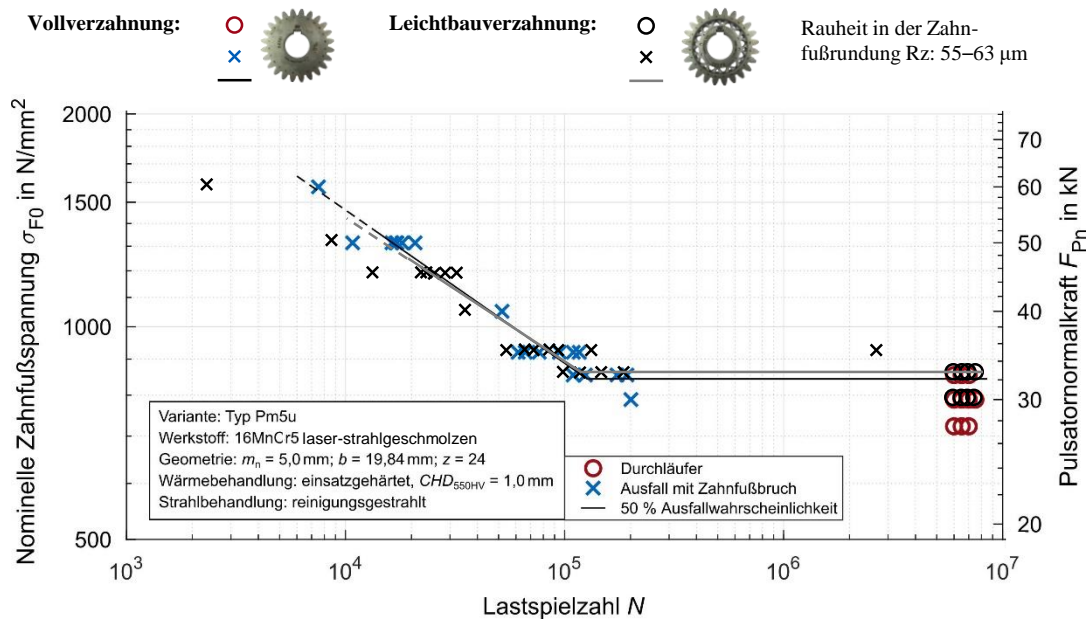


Abbildung 73: Ergebnis der Pulsatorversuche gegen Zahnfußbruch

Eine dauerfeste ertragbare Pulsatornormalkraft mit 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit kann für die Vollverzahnung bei 31,1 kN bestimmt werden. Für die Leichtbauverzahnung lässt sich der entsprechende Wert mit 32,6 kN ermitteln.

Im Rahmen der zugrundeliegenden Statistik und der Messunsicherheit ist in der Zahnfußtragfähigkeit der Vollverzahnung und der leichtbauoptimierten Verzahnung kein Unterschied zu ermitteln. Bei der Prüfung der Leichtbauverzahnungen trat immer zuerst ein Bruch im Zahnfuß auf. Der Ausgangspunkt des schlussendlichen Gewaltbruchs lag nach REM-Aufnahme jeweils an der Oberfläche oder an oberflächennahen Fehlstellen, die durch die verbliebene Restporosität vorhanden sind. Ein Versagen der Leichtbaustruktur trat selbst bei höchsten Pulsatorkräften nicht auf. Auch eine plastische Verformung wurde nicht beobachtet. Auf Basis der Versuche kann abgeleitet werden, dass die Leichtbaustruktur nicht als Schwachstelle wirkt. Ebenso versagte der verbleibende Zahnkranz nicht. Ein Einflussfaktor der sowohl auf die Vollverzahnung, als auch auf die leichtbauoptimierten Verzahnungen, zutrifft ist der unzureichende Kohlenstoffgehalt durch den Verlust von Kohlenstoff von Pulver zu Bauteil (vgl. Abschnitt 5.7). Dies ist beim Vergleich mit Referenzwerten von schmelzmetallurgischen Verzahnungen zu berücksichtigen.

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

---

Die Pulsatornormalkraft bei 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit  $F_{P_{n\infty,50\%}}$  kann in die Zahnfußnennspannung  $\sigma_{F_{0,\infty,50\%}}$  und in die Zahnfußdauerfestigkeit  $\sigma_{Flim,1\%}$  entsprechend ISO 6336-3 umgerechnet werden (ISO 6336-3). Dazu dienen folgende Gleichungen:

$$\sigma_{F_{0,\infty,50\%}} = \frac{F_{P_{n\infty,50\%}} \cos \alpha_n}{b m_n} Y_F Y_S Y_\beta Y_B Y_{DT} \quad (10)$$

$$\sigma_{Flim,1\%} = \frac{F_{P_{n\infty,50\%}} \cos \alpha_n}{b m_n} \frac{0,9 f_{1\%}}{Y_{ST} Y_{\delta_{relT}} Y_{RrelT} Y_X}. \quad (11)$$

Die folgenden Korrekturfaktoren basieren auf der Verzahnungsgeometrie und der Fertigungsroute und werden aus ISO 6336-3, STAHL ET AL. 1999 und der FVA Richtlinie 563/I abgeleitet. Der Normaleingriffswinkel  $\alpha_n$  ist  $20^\circ$ , die Breite  $b$  beträgt 20 mm und der Modul  $m_n$  ist 5 mm. Der Formfaktor  $Y_F$  wird mit 1,382 festgelegt, der Spannungskorrekturfaktor  $Y_S$  mit 2,008 und der Schrägungsfaktor  $Y_\beta$  mit 1,00 nach ISO 6336-3. Der Zahnkranzdickenfaktor  $Y_B$  und der Hochverzahnungsfaktor  $Y_{DT}$  werden basierend auf den geometrischen Größen der Verzahnung mit 1,00 angenommen. Der Größenfaktor  $Y_X$  wird mit 1,00 und  $f_{1\%}$  nach STAHL ET AL. 1999 mit 0,92 für einsatzgehärtete Verzahnungen beziffert. Der Spannungskorrekturfaktor  $Y_{ST}$  für das Referenzprüfrad beträgt 2,00. Die relative Stützziffer  $Y_{\delta_{relT}}$  wird mit 0,997 festgelegt. Für den relativen Oberflächenfaktor  $Y_{RrelT}$  wird ein Wert von 0,907 bestimmt, welcher einer Oberflächenrauheit von  $Rz\ 40\ \mu m$  entspricht. Nach ISO 6336-3 ist der relative Oberflächenfaktor nur bis  $Rz\ 40\ \mu m$  definiert. Dies stellt eine Limitierung dar, da die Oberflächenrauheit der AM-Verzahnungen im Bereich von  $Rz\ 55$  bis  $63\ \mu m$  liegt. Eine Extrapolation des Oberflächenfaktors  $Y_{RrelT}$  für eine Rauheit von  $Rz\ 63\ \mu m$  würde einen Wert von 0,873 ergeben, welcher ca. 3,7 Prozent von dem maximal zulässigen relativen Oberflächenfaktor  $Y_{RrelT}$  aus ISO 6336-3 abweicht. Um den Gültigkeitsbereich der Berechnung der Zahnfußdauerfestigkeit nach ISO 6336-3 nicht zu verlassen wird auf eine Extrapolation der Normwerte verzichtet.

Mit den dargestellten Werten lässt sich für die Vollverzahnung und die Leichtbauverzahnung die Zahnfußnennspannung und die Zahnfußdauerfestigkeit berechnen (siehe Tabelle 14).

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

Tabelle 14: Tragfähigkeit der AM-Verzahnung gegen Zahnfußbruch

Werte nach ISO 6336-3	Vollverzahnung	LB-Verzahnung
Zahnfußnennspannung $\sigma_{F0,\infty,50\%}$	843 N/mm <sup>2</sup>	865 N/mm <sup>2</sup>
Zahnfußdauerfestigkeit $\sigma_{Flim,1\%}$	386 N/mm <sup>2</sup>	396 N/mm <sup>2</sup>

Im Rahmen der verfügbaren Daten und der Messunsicherheit lässt sich kein signifikanter Unterschied der Zahnfußnennspannung und Zahnfußdauerfestigkeit zwischen Vollverzahnung und Leichtbauverzahnung ermitteln. Von statistischer Signifikanz im Pulsatorversuch kann bei einem Unterschied von mehr als 5 % des ermittelten Werts ausgegangen werden. Für die Zahnfußnennspannung  $\sigma_{F0,\infty,50\%}$  entspricht dies einer minimalen Abweichung von ca. 50 N/mm<sup>2</sup>. Die Leistungsdichte (Tragfähigkeit pro Gewichtseinheit) der Leichtbauverzahnungen ist mit der vergleichbaren Zahnfußdauerfestigkeit signifikant erhöht. Mit den dargestellten Werten ist eine Ordnung der Zahnfußtragfähigkeit der laser-strahlgeschmolzenen Verzahnung in ISO 6336-5 möglich. Im Vergleich zu bereits ermittelten Zahnfußnennspannungen von Vollverzahnungen  $\sigma_{F0,\infty,50\%}$  von 830 N/mm<sup>2</sup> von KAMPS 2018 und den vorliegenden Ergebnissen zeigt sich kein signifikanter Unterschied. Die Tragfähigkeitskennwerte durch KONOWALCZYK ET AL. und später durch KLEE & LANTZSCH werden um das 1,8-fache übertroffen (KONOWALCZYK ET AL. 2017, KLEE & LANTZSCH 2021). Die Vermeidung von Fehlstellen im Laser-Strahlschmelzen und die geeignete Auswahl der Prozessgrößen sind damit zielführend und notwendig für die Herstellung belastbarer AM-Verzahnungen. Im Vergleich zu schmelzmetallurgisch hergestellten Verzahnungen mit signifikant besseren Oberflächen im Zahnfuß ist ein Abfall der Zahnfußdauerfestigkeit von 8 bzw. 15 % (940 N/mm<sup>2</sup> bzw. 1017 N/mm<sup>2</sup>) erkennbar (NIEMANN & WINTER 2003, KOLLER ET AL. 2010).

Die dynamische Zahnflankentragfähigkeit der Prüfverzahnungen Typ-1 mit verschiedenen Leichtbauvarianten wurde mit Hilfe von genormten FZG-Zahnradverspannungsprüfständen untersucht (DIN ISO 14635-1). Die Versuchsdurchführung und -auswertung erfolgte nach standardisierten Richtlinien und anerkannten Vorgehensweisen (BERGMANN ET AL. 1999, FVA-Richtlinie 563/I ). Die Verzahnungen haben die komplette Prozesskette inkl. Hartfeinbearbeitung durchlaufen und wurden mit dem 30  $\mu$ m Schichtstärken-Parametersatz gefertigt. Die Rauheit der

geschliffenen Zahnflanken liegt mit  $R_a 0,44 \mu\text{m}$  oberhalb der üblichen Forderungen für Prüfverzahnungen von  $R_a 0,2$  bis  $0,4 \mu\text{m}$ , jedoch im Bereich praxisüblicher, kosteneffizienter Verzahnungen.

Die Prüfung erfolgte ebenfalls nach dem Treppenstufenverfahren. Ein Versuchspunkt wurde als Durchläufer beim Erreichen der Grenzlastspielzahl definiert nach FVA-Richtlinie 563/I ( $5 \times 10^7$  Lastspiele) gezählt. Die Grenzlastspielzahl zur Ermittlung der Flankentragfähigkeit ist höher als die Grenzlastspielzahl im Pulsatorversuch. Ein Ausfall mit Grübchen lag vor, falls die Fläche der auftretenden Grübchen 4 % der Flankenfläche eines Zahnes überschritten hatte bevor die Grenzlastspielzahl erreicht wurde (FVA-Richtlinie 563/I). Bei einem Durchläufer wurde im nächsten Versuch das Lastniveau, d. h. das Drehmoment am Ritzel erhöht, bei einem Versagen wegen Grübchen entsprechend verringert. Aus den Ergebnissen ergibt sich ein Wöhlerdiagramm. Der Prüfstand wird mit einer Ritzeldrehzahl von 3000 Umdrehungen pro Minute betrieben und ist mit einer Einspritzschmierung (Öl: FVA 3A,  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) versehen.

Das Drehmoment am Ritzel wurde im Treppenstufenverfahren in den Bereichen von 275 bis 420 Nm variiert. Die Auswertung im Bereich der Dauerfestigkeit wurde nach dem modifizierten Probitverfahren nach HÖSEL & JOACHIM durchgeführt (HÖSEL & JOACHIM 1978). Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Ermittlung der Dauerfestigkeit. Es zeigt sich, dass das dauerfest ertragbare Ritzeldrehmoment  $T_{1\infty,50\%}$  bei 317 Nm liegt. Ein Unterschied in der Grübchenbildung zwischen Vollverzahnung und Leichtbauverzahnung konnte nicht festgestellt werden. Daher sind die Versuchspunkte gemeinsam im Wöhlerdiagramm eingetragen. Die Leichtbaustruktur und die reduzierte Zahnkranzdicke zeigen keine Schwächung der strukturellen Integrität der Verzahnungen im Laufversuch. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Zahnflankentragfähigkeit sind in Abbildung 74 dargestellt.

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

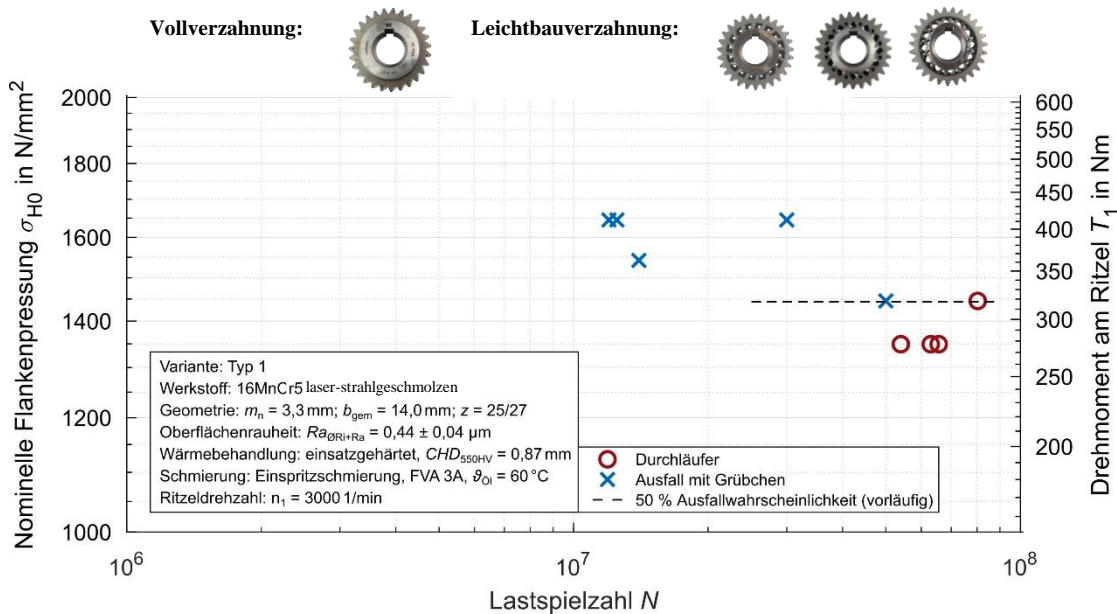


Abbildung 74: Ergebnis der Laufversuche auf Grübchentragfähigkeit

Das ersichtliche Ermüdungsverhalten und das Schadensbild der Grübchen sind grundsätzlich vergleichbar mit schmelzmetallurgischen Verzahnungen. Als Unterschied ist das Auftreten von sehr kleinen, stabilen Grübchen zu beobachten, die trotz der erzielten Oberflächenhärte auftraten. Oberflächennahe Porosität kann zu diesen Ausbrüchen führen, wobei die lokal auftretenden Spannungen durch die Materialausbrüche verringert werden und ein stabiles Verhalten der Grübchen hervorgerufen wird. Die Prüfräder weisen außerdem Graufleckigkeit auf, die durch die Oberflächenrauheit von Ra 0,44  $\mu\text{m}$  zu erwarten ist.

Anschließend lässt sich das Drehmoment am Ritzel in die nominelle Flankenpressung im Wälzpunkt  $\sigma_{H0,\infty,50\%}$  und in die Dauerfestigkeit der Flankenpressung  $\sigma_{Hlim,1\%}$  nach ISO 6336-2 umrechnen. Dazu dienen folgende Gleichungen:

$$\sigma_{H0,\infty,50\%} = Z_H Z_E Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d_1} \frac{u+1}{b u}} \quad (12)$$

$$\sigma_{Hlim,1\%} = \frac{Z_D f_{1\%H} \sigma_{H0,\infty,50\%} \sqrt{K_A K_\gamma K_v K_{H\beta} K_{H\alpha}}}{Z_L Z_V Z_R Z_W Z_X} \quad (13)$$

Der Zonenfaktor  $Z_H$  wird mit 2,313 festgelegt, der Elastizitätsfaktor  $Z_E$  mit  $191,646 \frac{\sqrt{N}}{\text{mm}}$ , der Überdeckungsfaktor  $Z_\varepsilon$  mit 0,932 und der Schrägenfaktor  $Z_\beta$  mit 1,025 nach ISO 6336-2.  $F_t$  ist die Nenn-Umfangskraft, die aus dem Drehmoment

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

nach ISO 6336-1 und den Verzahnungsdaten berechnet werden kann. Die Zahnbreite  $b$  beträgt 14 mm, während der Teilkreisdurchmesser  $d_1$  mit 82,5 mm festgelegt ist. Das Zähnezahlnverhältnis  $u$  beträgt 1,08 ( $\frac{\text{Zähnezahln Rad}}{\text{Zähnezahln Ritzel}} = \frac{27}{25}$ ). Der Einzeleingriffsfaktor des Rads  $Z_D$  beträgt 1,049 und  $f_{1\%H}$  ist 0,92. Der Anwendungsfaktor  $K_A$ , der Stirnfaktor  $K_{H\alpha}$  und der Aufteilungsfaktor  $K_V$  betragen 1,00. Der Dynamikfaktor  $K_V$  ist 1,10 und der Breitenfaktor  $K_{H\beta}$  ist 1,13. Der Schmierstofffaktor  $Z_L$  beträgt 0,960, während der Geschwindigkeitsfaktor  $Z_V$  bei 1,09 liegt. Der Rauheitsfaktor der Zahnflanke  $Z_R$  beträgt 1,003. Die Faktoren für die Werkstoffpaarung  $Z_W$  und die Größe  $Z_X$  betragen 1,00. Die mit den aufgeführten Faktoren errechnete nominelle Flankenpressung und Dauerfestigkeit der Flankenpressung sind in Tabelle 15 aufgeführt.

*Tabelle 15: Tragfähigkeit der AM Verzahnungen*

Werte nach ISO 6336-2	AM-Verzahnung
Nominelle Flankenpressung $\sigma_{H0,\infty,50\%}$	1444 N/mm <sup>2</sup>
Dauerfestigkeit der Flankenpressung $\sigma_{Hlim,1\%}$	1599 N/mm <sup>2</sup>

Weitere Untersuchungen an geradverzahnten AM-Verzahnungen lassen eine Berechnung der Dauerfestigkeit der Flankenpressung von 1549 N/mm<sup>2</sup> zu und bestätigen die dargestellten Untersuchungen der industrietypischen Typ-1-Verzahnung (siehe Anhang Abbildung 103, Typ 17/18 Geradverzahnung, reduzierte CHD durch kleine Bauform). Mit den dargestellten Werten ist eine Einordnung der Zahnfußtragfähigkeit der laserstrahlgeschmolzenen Verzahnung in ISO 6336-5 möglich. Literaturwerte als Vergleich für additiv gefertigte Verzahnungen liegen bisher nicht vor. Ein Vergleich mit Literaturwerten für schmelzmetallurgisch hergestellte Verzahnungen zeigt, dass die erzielte Dauerfestigkeit der Flankenpressung  $\sigma_{Hlim,1\%}$  mit den Festigkeitskennwerten von KOLLER, TOBIE ET AL. 2010 (1574 N/mm<sup>2</sup>) vergleichbar ist und ca. 9 % über dem Anhaltswert für Festigkeitskennwerte von NIEMANN & WINTER 2003 (1470 N/mm<sup>2</sup>) für den Werkstoff 16MnCr5 liegt.

## 7.5 Analyse der Bauteileigenschaften und Einordnung nach ISO 6336-5

Im nächsten Schritt werden die Materialeigenschaften der gefertigten Verzahnungen nach Durchlaufen der Prozesskette analysiert und mit den übergeordneten Materialanforderungen an Zahnräder aus der ISO 6336-5 verglichen.

Die Oberflächenhärte (700 HV) im Zahnfuß beider Prüfverzahnungen entspricht den Zielanforderungen aus der Fertigungszeichnung. Ebenso werden die Anforderungen an ein gleichmäßiges Gefüge im Zahnfuß eingehalten. Die geforderte Einsatzhärtetiefe (0,8 bis 1,0 mm) für die Pulsatorräder und die Typ 1-Verzahnungen wird an Zahnfuß und Zahnflanke erreicht. Randoxidation und Oberflächenrisse waren nicht festzustellen. Eine vollständige Auflistung der Anforderungen ist in Tabelle 16 zusammengefasst.

Anforderung	ML	MQ	ME	AM-Material
Oberflächenhärte im Zahnfuß	k. S. ✓	definiert vom Anwender ✓	definiert vom Anwender ✓	ja
Gefüge im Zahnfuß	k. S. ✓	Martensit, nadelförmiger Ferrit und Bainit. Kein blockiger Ferrit ✓		ja
Einsatzhärtetiefe	k. S. ✓	definiert vom Anwender ✓	definiert vom Anwender ✓	ja
Randoxidation	k. S. ✓	gering ✓	nicht zulässig ✓	keine Randoxidation
Oberflächenrisse	k. S. ✓	nicht zulässig ✓	nicht zulässig ✓	keine Oberflächenrisse

k. S.: keine Spezifikation

✓ Anforderung erfüllt

✗ Anforderung nicht erfüllt

n. a.: nicht anwendbar

*Tabelle 16: Vergleich der Materialanforderungen aus ISO 6336-5 mit den erzielten AM-Materialeigenschaften an den AM-Verzahnungen*

Mit den ermittelten Werten für die Dauerfestigkeit der Zahnflanke und des Zahnfußes ist eine Einordnung in die ISO 6336-5 möglich. Es werden erwartbare Festigkeiten von schmelzmetallurgisch erzeugten Verzahnungen aus Einsatzstahl in

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

den Qualitäten ML, MQ und ME dargestellt und die Kennwerte der AM-Verzahnungen hinzugefügt (siehe Abbildung 75).

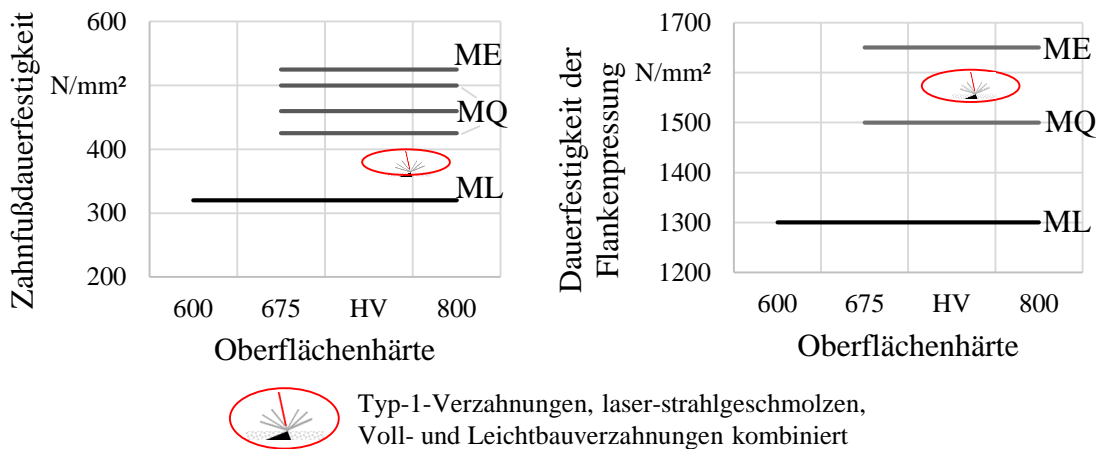


Abbildung 75: Einordnung der Zahnfuß- und Zahnflankendauerfestigkeit der AM-Verzahnungen in die ISO6336-5 für Verzahnungen aus Einsatzstahl

In der Dauerfestigkeit der Flankenpressung lassen sich die AM-Verzahnungen in einen mittleren Bereich zwischen den Qualitäten der MQ- und ME-Klasse einordnen. Dagegen liegen die AM-Verzahnungen im Bereich der Zahnfußdauerfestigkeit nur zwischen den Qualitäten der ML- und MQ-Klasse. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Kennwerte für die Flankenpressung an geschliffenen Flanken erzielt wurden, weshalb diese die tatsächliche AM-Materialqualität darstellen. Im Gegensatz dazu basieren die Kennwerte für die Zahnfußdauerfestigkeit auf einer Überlagerung der AM-Materialqualität und der AM-Bauteiloberfläche, weil die Kennwertermittlung am industrietypischen Standard einer unbearbeiteten Zahnfußrundung durchgeführt wurde, die bei AM-Verzahnungen eine signifikant höhere Oberflächenrauigkeit ( $R_z$  55 bis 63  $\mu\text{m}$ ) mit sich bringt als bei zerspannten schmelzmetallurgischen Verzahnungen ( $R_z$  4 bis 15  $\mu\text{m}$ ).

### 7.6 Konstruktions- und Fertigungsrichtlinien

Mit den dargestellten Fertigungsrestriktionen, Material- und Bauteileigenschaften lassen sich übergeordnete Konstruktions- und Auslegungsempfehlungen für die Leichtbauverzahnungen und den Prozess ableiten. Diese beinhalten einerseits Empfehlungen für den Schritt der Designentwicklung, unter anderem Minstdurchmesser der Leichtbaustrukturen und Verzugsreduktion, andererseits Kennwerte für eine softwarebasierte Auslegung (z. B. FEM) und Auslegung der Verzahnungstragfähigkeit nach ISO 6336. Mit Hilfe dieser Empfehlungen werden der



## **Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen**

---

Produktentwicklungsprozess und die Auslegung von AM-Verzahnungen für Konstrukteurinnen und Entwicklungsingenieure stark vereinfacht. Mit Hilfe der empirisch ermittelten Kennwerte ist eine sichere Auslegung durch die FEM und die Anwendung der Verzahnungsauslegung nach Normen möglich. Es kann ein iteratives Trial-and-Error-Vorgehen ersetzt werden. Die dargestellten Empfehlungen erweitern die Vorarbeiten von KAMPS unter anderem um die Festlegung der optimalen Orientierung und Wahl des Designraums für Leichtbauoptimierungen (KAMPS 2018). Die Konstruktionsempfehlungen sind in Abbildung 76 zu sehen; es werden ungünstige und günstige Lösungskonzepte gegenübergestellt, wie es aus Konstruktionsempfehlungen für andere Fertigungsverfahren wie z. B. für das Gießen bekannt ist.

## Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

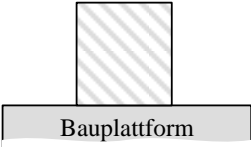
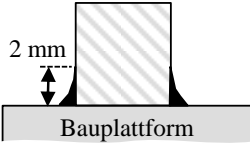
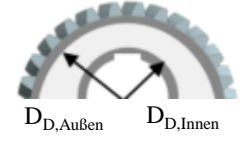
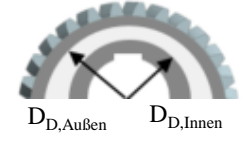
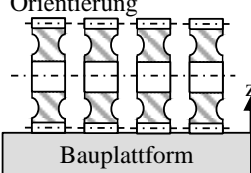
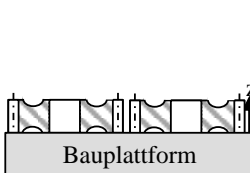
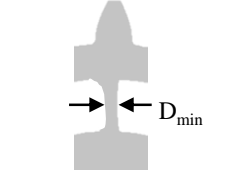
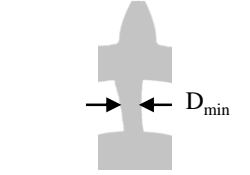




Ungünstig	Günstig	Erklärung	Empfehlungen
<p>Anbindung Bauplatte</p>  <p>Bauplatte</p> <p>Bauplatzform</p>	 <p>2 mm</p> <p>Bauplatzform</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Kerbwirkung</li> <li>Steifigkeit gegenüber Eigenspannungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausrundung von 2 mm nach MATTHECK 2010</li> <li>Bauplatzformdicke von 30 mm</li> </ul>
<p>Designraum</p>  <p><math>D_{D,Außen}</math> <math>D_{D,Innen}</math></p>	 <p><math>D_{D,Außen}</math> <math>D_{D,Innen}</math></p> <p>□ Designraum ■ Non-Designraum</p>	<p>Bereich für Leichtbaustrukturen</p>	$D_{D,Innen} \geq 1,8 \cdot m_n$ $D_{D,Außen} \leq D_F - S_R$ mit $S_R$ nach Abschnitt 4.3 $m_n$ : Normalmodul $D_F$ : Fußkreisdurchmesser $S_R$ : Zahnkranzdicke
<p>Orientierung</p>  <p>Bauplatzform</p>	 <p>Bauplatzform</p>	<p>Ausrichtung für maximale Festigkeit auf der Zahnflanke durch Anisotropie</p>	<p>Liegende Zahnradorientierung</p>
<p>Leichtbaustruktur</p>  <p><math>D_{min}</math></p>	 <p><math>D_{min}</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion Festigkeit bei kleinen Merkmalen</li> <li>Vermeidung Durchhärtung beim Einsatzhärten</li> </ul>	$D_{min} = \max. \begin{cases} 3 \text{ mm} \\ 3 \cdot \text{CHD} \end{cases}$
<p>Verzug</p> 		<ul style="list-style-type: none"> <li>Steifigkeit in radialer Richtung sicherstellen</li> <li>Reduktion Verzug entlang der Prozesskette</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Engmaschige Abstützung des Zahnkranz</li> <li>Gleichmäßige Verteilung innerhalb des Zahnkranzes</li> </ul>
<p>Aufmaß</p>  <p>□ Globales Aufmaß</p>	 <p>■ Aufmaß Flanken ■ Aufmaß Bohrung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Merkmalsabhängiges Aufmaß in Bohrung und Flanke</li> <li>Skalierung um Größenreduktion vorzuhalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Skalierung: +0,5%</li> <li>Aufmaß an Flanken: 0,30-0,40 mm</li> <li>Aufmaß an Bohrung: 0,15-0,20 mm</li> </ul>

Abbildung 76: Konstruktionsempfehlungen für AM-Leichtbauverzahnungen

Insbesondere die Bauweise hat Einfluss auf den Verzug und dem damit notwendigen Aufmaß zur späteren Kompensation im Schleifprozess. Deshalb sollte eine engmaschige Abstützung unterhalb des Zahnkranzes erfolgen und symmetrische Strukturen sollten bevorzugt werden.

# Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen

In Abbildung 77 sind die benötigten Kennwerte zur Auslegung von AM-Verzahnungen zusammengestellt.

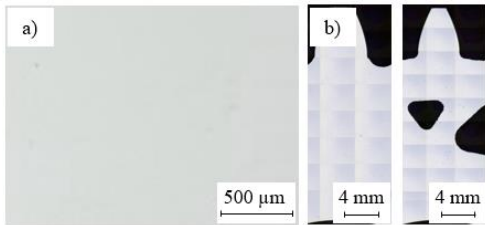
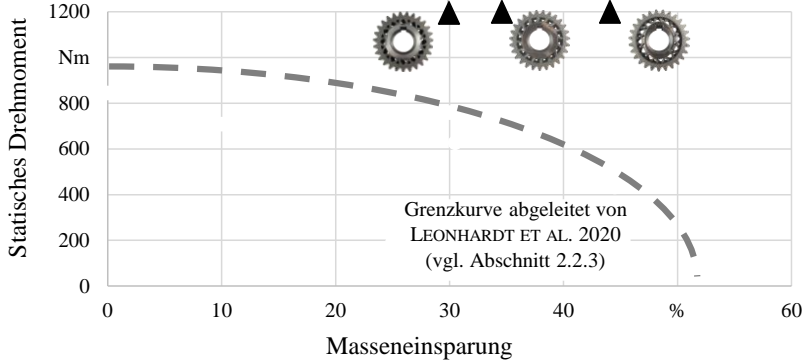
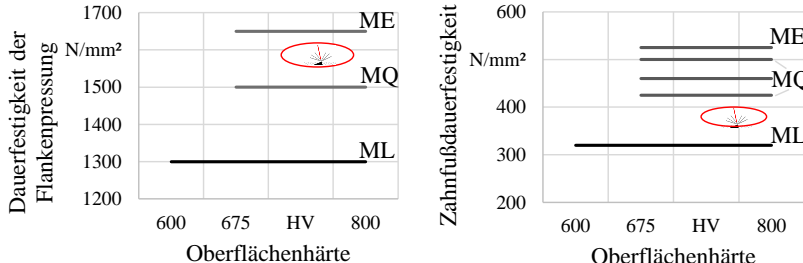
Kennwerte	Erklärung							
<p>Relative Dichte (<math>\rho_{rel}</math>)</p> <p>a) Probenkörper: <math>\rho_{rel} &gt; 99,80\%</math></p> <p>b) Verzahnung: <math>\rho_{rel} &gt; 99,70\%</math></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 30 µm Parametersatz</li> <li>▪ Mittelwert der Probenkörper</li> <li>▪ Probenkörper in Abhängigkeit der Bauplattenposition (siehe Abschnitt 7.1)</li> </ul>							
<p>Statische Materialeigenschaften</p> <table border="1" data-bbox="217 651 1043 734"> <tr> <td style="text-align: center;"><b>Zug</b> <math>R_m = 926 \text{ N/mm}^2</math></td> <td style="text-align: center;"><b>Druck</b> <math>\sigma_{D0,2} = 1435 \text{ N/mm}^2</math></td> <td style="text-align: center;"><b>Biegung</b> <math>\sigma_{B0,2} = 2400 \text{ N/mm}^2</math></td> </tr> </table> <p>Stehende Proben (90°), Einsatzgehärtet CHD = 1,2 mm  <math>R_m</math>: Zugfestigkeit   <math>\sigma_{D0,2}</math>: Drucksteifigkeit   <math>\sigma_{B0,2}</math>: Biegesteifigkeit</p>	<b>Zug</b> $R_m = 926 \text{ N/mm}^2$	<b>Druck</b> $\sigma_{D0,2} = 1435 \text{ N/mm}^2$	<b>Biegung</b> $\sigma_{B0,2} = 2400 \text{ N/mm}^2$	<p>90° Proben als worst-case Abschätzung auf Grund der Anisotropie</p>				
<b>Zug</b> $R_m = 926 \text{ N/mm}^2$	<b>Druck</b> $\sigma_{D0,2} = 1435 \text{ N/mm}^2$	<b>Biegung</b> $\sigma_{B0,2} = 2400 \text{ N/mm}^2$						
<p>Statische Tragfähigkeit</p>  <p>Grenzkurve abgeleitet von LEONHARDT ET AL. 2020 (vgl. Abschnitt 2.2.3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Statische Tragfähigkeit der AM-Verzahnungen höher als Leichtbau-Verzahnungen aus LEONHARDT ET AL. 2020</li> <li>▪ Hohes Potenzial zur Steigerung der Tragfähigkeit mit hohem Leichtbaugrad</li> </ul>							
<p>Dynamische Tragfähigkeit</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flankentragfähigkeit im MQ- bis mittleren ME-Bereich der Werkstoffqualität</li> <li>▪ Zahnfußtragfähigkeit zwischen ML- und MQ-Bereich der Werkstoffqualität durch Oberflächeneffekte</li> </ul>							
<p>Prozesskette und Nachbearbeitung</p> <table border="1" data-bbox="220 1648 1046 1805"> <tr> <td>Pulverherstellung</td> <td>Laser-Strahlschmelzen</td> <td>Spannungsarmglühen</td> <td>Weichbearbeitung</td> <td>Einsatzhärten</td> <td>Bearbeitung Zahnfuß</td> <td>Hartfeinbearbeitung</td> </tr> </table> <p>Mögliche Verfahren: Ausschleifen des Zahnfußes, Gleitschleifen, Kugelstrahlen, chemisches Polieren oder Ätzen</p>	Pulverherstellung	Laser-Strahlschmelzen	Spannungsarmglühen	Weichbearbeitung	Einsatzhärten	Bearbeitung Zahnfuß	Hartfeinbearbeitung	<p>Steigerung der Zahnfußdauerfestigkeit durch Reduktion der Oberflächenrauheit</p>
Pulverherstellung	Laser-Strahlschmelzen	Spannungsarmglühen	Weichbearbeitung	Einsatzhärten	Bearbeitung Zahnfuß	Hartfeinbearbeitung		

Abbildung 77: Auslegungskennwerte für AM-Leichtbauverzahnungen

Die statischen Materialeigenschaften beziehen sich dabei auf eine Belastung orthogonal zum Schichtaufbau (stehende Proben). Sie weisen die niedrigste Festigkeit auf und dienen dadurch als Minimalwert für Auslegung z. B. durch FEM. Der Vergleich der statischen Tragfähigkeit mit Ergebnissen des Forschungsvorhabens „Massiver Leichtbau“ zeigt das hohe Potenzial der AM-Fertigung in der Umsetzung von Leichtbaulösungen in Verzahnungen im Vergleich zu umformenden Lösungen (LEONHARDT ET AL. 2020). Bei der Anwendung der Zahnfußdauerfestigkeit ist zu berücksichtigen, dass diese sich mit einer Verbesserung der Oberfläche, z. B. durch Ausschleifen des Zahnfußes oder Strahlbehandlungen, weiter steigern lässt.

### 7.7 Fazit

Im Rahmen dieses Kapitels wurden Erkenntnisse zu Fertigungsrestriktionen, Festigkeitskennwerten, zur Tragfähigkeit von AM-Verzahnungen und deren Maßhaltigkeit erarbeitet und in allgemeine Auslegungs- und Konstruktionsempfehlungen überführt.

Der verwendete Parametersatz und das Fertigungssystem erweisen sich als stabil gegen geringe Abweichungen in der Laserleistung von  $\pm 10\%$ , z. B. durch eine Verschmutzung des Laserschutzglases oder Abweichungen in der Partikelgrößenverteilung des Pulverwerkstoffs. Dies spricht für einen robusten Fertigungsprozess mit einem großen Parameterfenster, was in zwölf Fertigungsaufträgen gezeigt wurde. Der Grenzwert der relativen Dichte aus VDI 3405 von 99,5 % wurde dabei im Rahmen der Untersuchungen nicht unterschritten.

Die ermittelten Festigkeitskennwerte entlang der Prozesskette zeigen einen großen Einfluss der Oberflächenrauheit und weisen nach der Einsatzhärtung eine Anisotropie mit geringster Festigkeit bei Belastung parallel zum Schichtaufbau auf. Die Zugfestigkeit an Proben im zerspannten Zustand ist 11 % höher als an Proben im As-built-Zustand. Ein Vergleich der Aufbaurichtungen zeigt, dass liegende Proben eine um 22 % erhöhte Festigkeit im Vergleich zu stehenden Proben haben. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die Festigkeitskennwerte mit einer Verringerung des Prüfquerschnitts um bis zu 40 % abnehmen. Daraus wurde ein Grenzwert für den minimalen Stabdurchmesser für Leichtbaustrukturen bestimmt, der bei 3 mm liegt.

Die ermittelten Festigkeitskennwerte beziehen sich auf die genutzte Kombination aus Anlagentechnik und Pulver. Andere Anlagentechnik kann sich beispielhaft in

## **Handlungsempfehlungen für die Auslegung und Fertigung von Leichtbauverzahnungen**

---

der Auftragsweise des Pulvers, der Schutzgasströmung und der Prozessnebenzeiten unterscheiden. Dies ist bei der Übertragung der Erkenntnisse zu berücksichtigen. Die Vorgehensweise kann zur Untersuchung von weiteren Maschinen herangezogen werden, um die Datenbasis zu erweitern mit dem Ziel allgemeingültige Kennwerte für das Laser-Strahlschmelzen von 16MnCr5 zu ermitteln.

Die Maß- und Formänderung der Leichtbauverzahnungen wurde im nächsten Schritt ermittelt. Generell kann mit der Fertigung von Bauteilen aus 16MnCr5 mittels Laser-Strahlschmelzen die ISO-Grundtoleranz von 12 erreicht werden. Die Gestaltung der Leichtbaustruktur in Verzahnungen beeinflusst die Maßhaltigkeit signifikant. Bauteile mit geringer Steifigkeit (Gitterstrukturen oder geringe Speichenanzahl) zeigen eine Formabweichung um den Faktor 2–3 im Vergleich zur Formabweichung einer Vollverzahnung.

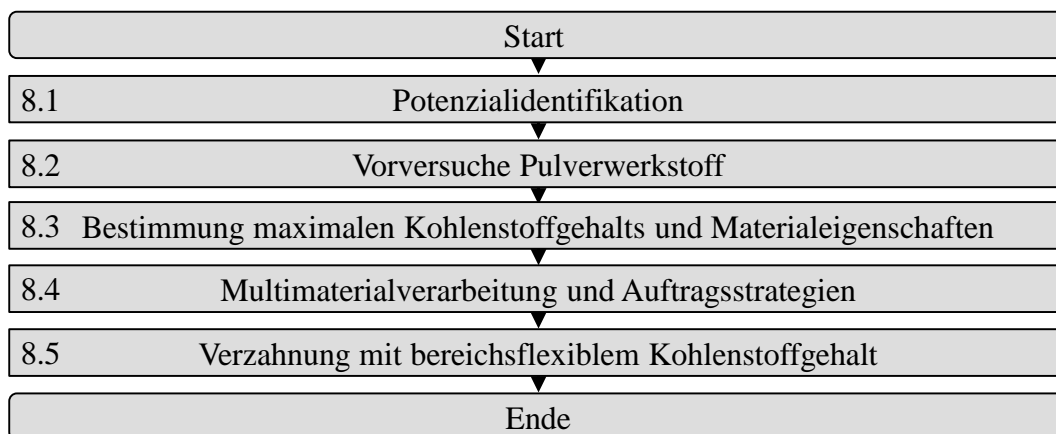
Des Weiteren wurden Leichtbauverzahnungen statisch und dynamisch belastet. Die statische Tragfähigkeit liegt zwei- bis dreimal über den Ansätzen der Leichtbauintegration durch Umformen. Die ermittelte Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeit war unabhängig von der eingesetzten Leichtbaugeometrie. Der festgelegte Designraum erweist sich damit als dauerhaft. Die Zahnfußtragfähigkeit ist durch die unregelmäßige Oberfläche der AM-Verzahnung im Zahnfuß reduziert und liegt ca. 8–15 % niedriger als schmelzmetallurgische Vergleichswerte. Literaturwerte von KONOWALCZYK ET AL. 2017 für AM-Verzahnungen wurden dabei um das 1,8-fache übertroffen. Erstmals wurde die Zahnflankentragfähigkeit von AM-Verzahnungen ermittelt, die im Bereich der Tragfähigkeit von schmelzmetallurgischen Verzahnungen liegt, was die erzielbare Materialqualität der AM-Verzahnungen verdeutlicht.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die AM-Verzahnungen die Anforderungen an Materialien der Klasse ME nach ISO 6336-5 hinsichtlich der Oberflächenhärte, des Gefüges im Zahnfuß, der Einsatzhärte, der Randoxidation und der Abwesenheit von Oberflächenrissen erfüllen. Dies wird durch die Zahnflankentragfähigkeit bestätigt, die im Bereich zwischen den Klassen MQ und ME liegt. Die erhöhte Oberflächenrauigkeit führte in der Ermittlung der Dauerfestigkeit des Zahnfußes zu einer reduzierten Tragfähigkeit und bedingt dadurch eine Einordnung in den Bereich zwischen den Klassen ML und MQ. Der erhöhte Legierungsgehalt von Chrom und Mangan in Charge 2 und der damit verbundenen besseren Härte, hatte keinen messbaren Einfluss auf die Randhärte oder Einsatzhärte.

Die Ergebnisse wurden in Konstruktions- und Auslegungsempfehlungen überführt, die Entwicklungsingenieurinnen relevante Informationen zur Gestaltung von AM-Leichtbauverzahnungen gesammelt zur Verfügung stellen. Tiefergehende Informationen können darauf aufbauend in den einzelnen Kapiteln gefunden werden. Die Ergebnisse sind übertrag- und vergleichbar, da genormte Testverfahren (z. B. Zugversuch oder Zahnfußtragfähigkeit) und standardisierte Prüfabläufe verwendet wurden. Ebenso sind die ermittelten Kennwerte Grundlage für allgemein angewandte Auslegungsmethoden (Normen oder Richtlinien) oder dienen als Materialmodell für die rechnergestützte Auslegung (FEM). Eingeschränkt werden die Ergebnisse durch die Abhängigkeit zur verwendeten Anlagentechnik und Prozesskette zur Herstellung der Proben und Verzahnungen. Die Bedingungen der Fertigung und die erzielten Ergebnisse sind entlang der Prozesskette durchgehend dokumentiert und erlauben daher einen Vergleich sowie eine Bewertung durch die Anwendenden.

## **8 Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens**

In diesem Kapitel wird die Kombination des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens für Verzahnungen betrachtet. Zuerst wird das Anwendungspotenzial identifiziert; es folgen Voruntersuchungen an Pulverwerkstoffen. Anschließend wird ein maximaler zu verarbeitender Kohlenstoffgehalt ausgewählt und resultierende Materialeigenschaften werden bestimmt. Aufbauend auf diesen Vorversuchen zum In-situ-Legieren wird die Multimaterialverarbeitung evaluiert, bevor ein Verzahnungsdemonstrator mit eingestelltem bereichsflexiblem Kohlenstoffgehalt vorgestellt wird. Das Vorgehen ist in Abbildung 78 dargestellt und orientiert sich an einer **Eigenschaftsanalyse** des Einsatzhärten (LINDEMANN 2009) und am **Vorgehen zur Qualifizierung des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens** (ANSTAETT 2020).



*Abbildung 78: Vorgehen zum In-situ-Legieren mit Kohlenstoff*

### **8.1 Potenzialidentifikation**

Das Einsatzhärten ist als industrielles Verfahren für die Randschichthärtung von Verzahnungen etabliert. Als Nachteil gilt, dass im gesamten Bauteil eine nahezu gleichmäßige Aufkohlung erfolgt (BARGEL & SCHULZE 2018). Lokale Unterschiede sind nicht einstellbar. Zusätzlich werden Bauteilbereiche gehärtet, die nicht als Funktionsfläche gelten. Eine Vermeidung der Aufkohlung in spezifischen

## Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens

Bauteilbereichen ist nur über Härteschutzpasten möglich, die aufwändig auf die Bauteilbereiche aufgetragen und nach dem Einsatzhärten entfernt werden müssen.

Dem gegenüber steht die Multimaterialverarbeitung im Laser-Strahlschmelzen, das eine dreidimensionale Verteilung von zwei Werkstoffen im Bauteil ermöglicht (ANSTAETT 2020). Die gezielte Einbringung eines zweiten, bereits mit Kohlenstoff angereicherten Werkstoffs während des Laser-Strahlschmelzens von Verzahnungen verbindet den Vorteil der Härtung durch Martensitbildung mit dem der erweiterten Designfreiheit. Gleichzeitig wird auf ein bekanntes Werkstoffsystem aufgebaut und Auslegungsempfehlungen wie Einsatzhärte-tiefen können übernommen werden. Die Kohlenstoffanreicherung des zweiten Werkstoffs kann dabei über einen zweiten Pulverwerkstoff erfolgen. Die neue Ziellegierung mit erhöhtem Kohlenstoffanteil bildet sich im Schmelzbad während des Laser-Strahlschmelzens aus (In-situ-Legieren). Der Ansatz des In-situ-Legierens ist aus der Werkstoffentwicklung für die additive Fertigung oder der gezielten Anpassung von Eigenschaften bekannt (SING ET AL. 2021, KOPTYUG ET AL. 2020). Zusammengenommen ergeben sich durch die Kombination der Multimaterialverarbeitung und des In-situ-Legierens Vorteile für das Design von (Leichtbau-)Verzahnungen, die in Abbildung 79 zusammengefasst sind.

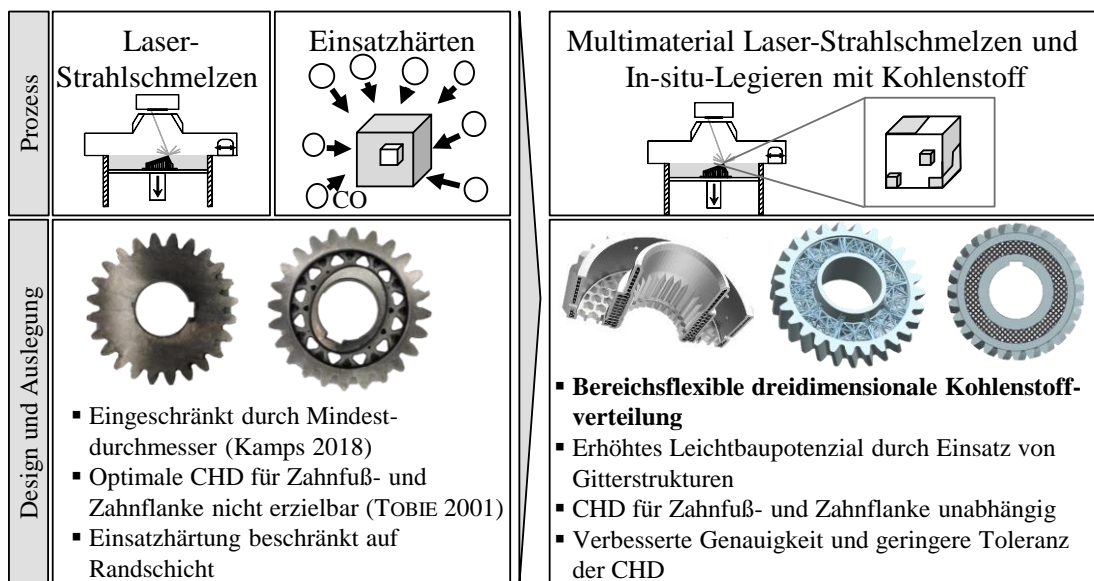


Abbildung 79: Vergleich der bisherigen Vorgehensweise und des In-situ-Legierens mit Kohlenstoff und die resultierenden Anforderungen an das Bauteildesign

Eine globale Einsatzhärtung schränkt die Verwendung von dünnen Leichtbau- und Gitterstrukturen ein. Für gute statische, dynamische Tragfähigkeiten wie auch für



## **Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens**

---

Kerbschlagarbeit wird in der Literatur ein Verhältnis von 0,08-0,2 von Einsatzhärte tiefe zu Stabdurchmesser gefordert (WICKE 1976, PARRISH 1980, VOGEL 1984, WIEGAND & TOLASCH 1967). Unter Beachtung dieser Auslegungsgrenze erzielt KAMPS eine Massereduktion von 27–35 % (KAMPS 2018). Dagegen wird durch den Einsatz von Gitterstrukturen und topologieoptimierten Streben geringen Querschnitts in verschiedenen Anwendungen die Masse deutlich stärker reduziert (Reibahle: -63 %, Fahrradkurbel: -59 %) (TEUFELHART 2016, LIPPERT 2018). Dieses Potenzial der erweiterten Masseinsparung gilt es durch die nicht mehr auftretende Versprödung durch das Einsatzhärten der Gitterstrukturen zu nutzen. Des Weiteren ergibt sich die Möglichkeit, die Einsatzhärte tiefe spezifisch auf die Tragfähigkeitsanforderungen des Zahnfußes und der Zahnflanke lokal anzupassen. Dabei ist eine erhöhte Einsatzhärte tiefe auf der Zahnflanke im Vergleich zum Zahnfuß gewünscht, was im konventionellen Einsatzhärten nicht gleichzeitig erzielt werden kann (TOBIE 2001). Ebenso lässt sich die Toleranz des Einsatzhärteprozesses verringern, wodurch eine verbesserte Auslegung von Hochleistungsverzahnungen ermöglicht wird (KAFFENBERGER 2013). Dies trifft insbesondere auf kleine Module wie E-Bike-Verzahnungen zu, die ein Höchstmaß an Präzision erfordern (LIEBHERR 2019). Zusätzlich wird durch die Vermeidung des Aufkohlens ein langer Prozessschritt bei hohen Temperaturen eliminiert, was zu Kosteneinsparungen und einer Steigerung der Ressourceneffizienz führen kann.

Um die genannten Potenziale umsetzen zu können, wird im nächsten Schritt die Verarbeitung von Pulvermischungen bis 0,8 Ma.-% Kohlenstoff untersucht. 0,8 Ma.-% Kohlenstoff werden als Grenzwert des konventionellen Einsatzhärtens abgeleitet, da darüber hinaus mit vermehrtem Restaustenit zu rechnen ist. Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung ist die Erzielung hoher Dichtewerte und die Vermeidung von Rissen. Gleichzeitig müssen die geforderte Randhärte (650–800 HV) und der Härte tiefenverlauf (0,15–0,2 Modul) für Verzahnungen erzielbar sein (NIEMANN & WINTER 2003). Für die Funktionsweise des Multimaterialauftragmoduls sei an dieser Stelle auf die Arbeit von ANSTAETT und BINDER ET AL. verwiesen (ANSTAETT 2020, BINDER ET AL. 2018). Das weitere Vorgehen orientiert sich an dem Vorgehen zur Qualifizierung von 3D-Multimaterialkombinationen von ANSTAETT (ANSTAETT 2020).

## 8.2 Vorversuche Pulverwerkstoff

Der zweite mit Kohlenstoff angereicherte Werkstoff basiert auf einer Mischung des Ausgangspulvers 16MnCr5 mit kohlenstoffhaltigen Pulvern. Über das Mischungsverhältnis kann der Kohlenstoffgehalt eingestellt werden. Dieser Ansatz erlaubt die flexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts, um die Verarbeitung im Laser-Strahlschmelzen zu bewerten. Zuerst muss allerdings ein geeignetes kohlenstoffhaltiges Pulver ausgewählt werden.

Als kohlenstoffhaltige Pulver werden zwei Graphit-Pulver und ein Glaskohlenstoff-Pulver identifiziert. Die Graphit-Pulver besitzen jeweils einen Kohlenstoffgehalt von mehr als 99 %, unterscheiden sich aber in der Partikelgrößenverteilung und dienen als Hilfsstoff in der Gießerei. Das Glaskohlenstoff-Pulver besteht aus reinem Kohlenstoff, der kristalline Eigenschaften durch den Aufbau in Basalebenen hat. Beim Vergleich der Partikelgrößen zeigt sich, dass das Graphit-Pulver 1 aus vielen kleinen Partikeln mit einem Durchmesser von 10  $\mu\text{m}$  besteht. Diese sind unförmig und haften teilweise an größeren 16MnCr5-Partikeln (vgl. Abbildung 80).

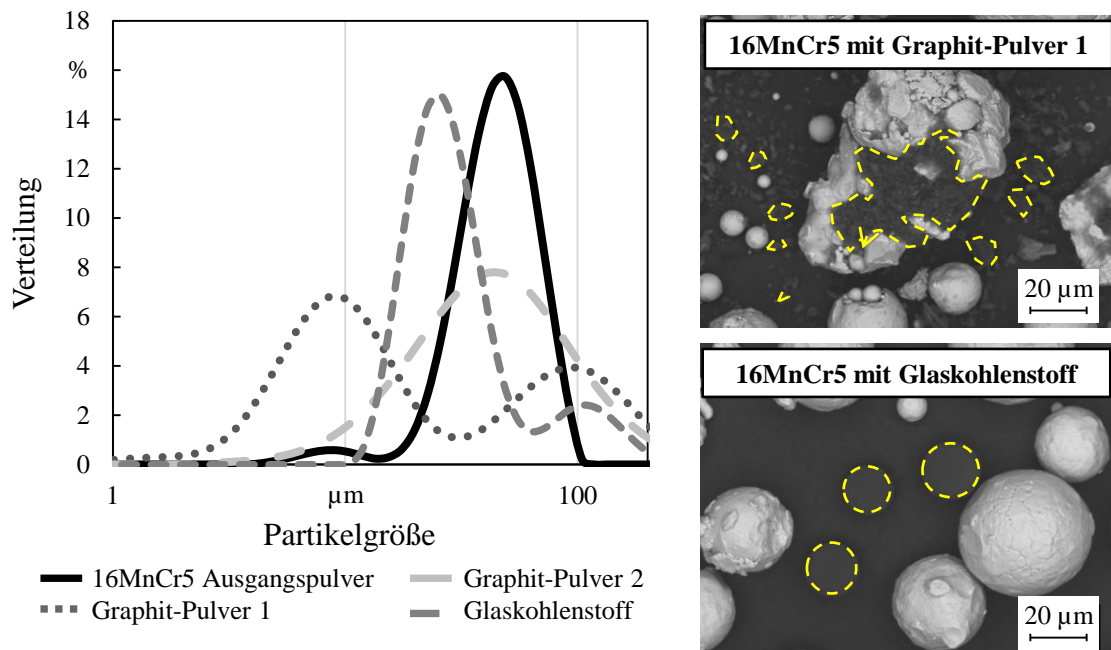


Abbildung 80: Vergleich der Partikelgrößenverteilung und der Partikelform der kohlenstoffhaltigen Pulvermischungen (gelb: Außenkontur der Graphit- oder Glaskohlenstoff-Partikel)

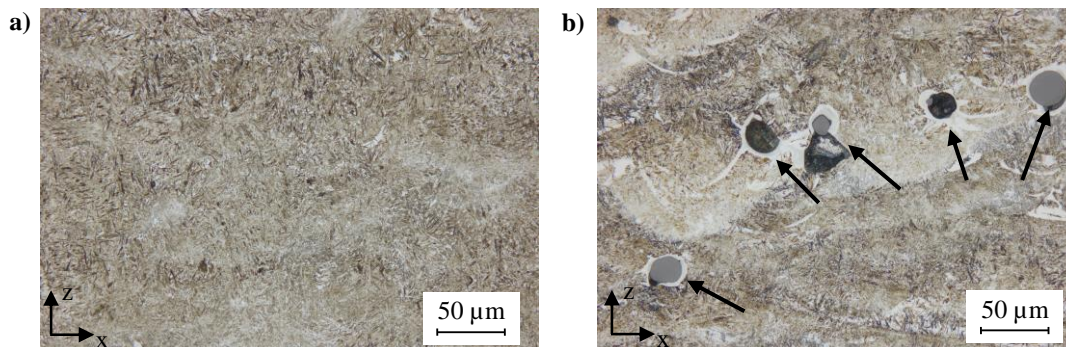
Das Graphit-Pulver 2 dagegen hat eine ähnliche Partikelgröße wie das 16MnCr5-Pulver mit teilweise sehr großen Partikeln mit Durchmessern von 40 bis 50  $\mu\text{m}$ .

## **Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens**

---

Ein Anhaften ist nicht zu beobachten. Die Glaskohlenstoff-Partikel verfügen über eine gleichmäßig runde Form und sind im Mittel etwas kleiner als die 16MnCr5-Partikel. Der Kohlenstoffgehalt wird mit 99,9 % angegeben. Basierend auf dem Vergleich wurden das Graphit-Pulver 1 und das Glaskohlenstoff-Pulver für die experimentelle Untersuchung ausgewählt. Durch die kleineren Partikel und das Anhaften der Partikel im Fall des Graphit-Pulver 1 wird eine bessere Durchmischung und daraus resultierend eine homogene Verteilung des Kohlenstoffs im aufgeschmolzenem Zustand erwartet (GOTTWALT 2019).

Anschließend wurden jeweils Probekörper mit einer Pulvermischung aus 16MnCr5-Ausgangspulver und Graphit-Pulver 1 bzw. Glaskohlenstoff-Pulver in Vorversuchen auf der EOS M290 Laser-Strahlschmelzanlage mit dem Parametersatz 16MnCr5 und einer Schichtstärke von 30  $\mu\text{m}$  aufgebaut. Der Kohlenstoffgehalt der Pulvermischung wurde nur für erste Stichversuche geringfügig auf 0,3 Ma.-% erhöht. Beide Pulvermischungen konnten ohne Auffälligkeiten im Laser-Strahlschmelzprozess verarbeitet werden. Ein Schliffbild in xz-Ebene (z-Richtung: Aufbaurichtung) ist jeweils in Abbildung 81 gezeigt.



*Abbildung 81: Schliffbilder der kohlenstoffangereicherten Pulvermischung  
a) Graphit-Pulver 1 b) Glaskohlenstoff*

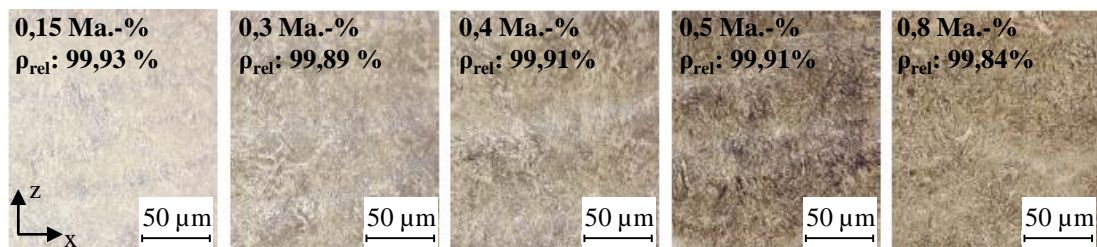
Es ist zu sehen, dass die Graphitpartikel vollständig aufgelöst sind und ein homogenes Gefüge erzeugt wurde. Dagegen sind im Schliffbild des Glaskohlenstoff-Probekörpers noch einzelne Partikel zu sehen, die im Prozess nicht aufgeschmolzen wurden. Als Resultat ist ein sehr inhomogenes Gefüge mit austenitischen Bereichen festzuhalten. Die Verwendung von Glaskohlenstoff führt zu keiner vollständigen Löslichkeit und wird damit für weitere Versuche ausgeschlossen.

## **8.3 Bestimmung der Verarbeitbarkeitsgrenze und der Materialeigenschaften**

### **8.3.1 Verarbeitbarkeitsgrenzen**

Um die bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts als Alternative zum Einsatzhärten mit Aufkohlung in Betracht ziehen zu können, muss die Verarbeitung von Pulvermischungen mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,8 Ma.-% möglich sein, da dies dem eingestellten Randkohlenstoffgehalt des Einsatzhärtens entspricht (BARGEL & SCHULZE 2018). Außerdem dient 0,8 Ma.-% Kohlenstoff als oberer Grenzwert, da darüber hinaus mit keiner weiteren Härtesteigerung durch höhere Anteile von Restaustenit zu rechnen ist (KAFFENBERGER 2013). Bei diesem Randkohlenstoffgehalt ergibt sich eine Randhärte von ca. 650–800 HV je nach Anlasstemperatur (LIEDTKE 2008). Mit steigendem Kohlenstoffgehalt wächst allerdings auch die Gefahr der Rissbildung (SCHULZE 2010). Die Verarbeitung von Stählen im Laser-Strahlschmelzen mit Kohlenstoffgehalten von ca. 0,8 Ma.-% ist mit geeigneten Prozessparametersätzen möglich, wie beispielsweise für die Werkstoffe SC75C und HSS M2 in der Literatur beschrieben ist (NAKAMOTO ET AL. 2009, ZUMOFEN ET AL. 2017).

Zu diesem Zweck wurde der Kohlenstoffgehalt schrittweise von 0,15 Ma.-% (Ausgangspulver) auf 0,8 Ma.-% über die Stufen 0,3 Ma.-%, 0,4 Ma.-% und 0,5 Ma.-% Kohlenstoff gesteigert, um einen Grenzwert der Verarbeitung zu ermitteln. Dazu wurde dem 16MnCr5-Ausgangspulver anteilig Graphit (Pulver 1) beigegeben und die Mischung mit einem Rhönradmischer homogenisiert. Anschließend erfolgte eine Verarbeitung auf der EOS M290 mit dem entwickelten Parametersatz für eine 30  $\mu\text{m}$  Schichtstärke. Es wurde für alle Versuche eine Bauplattentemperatur von 80 °C gewählt. In Abbildung 82 sind die Querschliffe der untersuchten Proben mit den zugehörigen Dichtewerten dargestellt.



*Abbildung 82: Querschliffe der Proben mit variiertem Kohlenstoffgehalt*

## Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens

Bei der Betrachtung der Schlitze und der Dichtewerte zeigt sich, dass die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts nicht zu verstärkter Porosität und Rissbildung führt. Alle untersuchten Proben besitzen eine Dichte von mehr als 99,8 % und liegen damit über dem Grenzwert der VDI 3405 von 99,5 % (VDI 3405 BLATT 2). Eine Anpassung des Belichtungsparametersatzes ist auf Basis der vorgestellten Untersuchungen nicht notwendig. Eine Erhöhung des Kohlenstoffgehalts durch Graphitbeimischung bis zum Zielwert von 0,8 Ma.-% (vergleichbar mit dem Einsatzhärten) führt zu keiner Verschlechterung der Bauteilqualität trotz eines  $C_{eq}$  von mehr als 1,18 %.

Das resultierende Gefüge der Proben ändert sich stark mit steigendem Kohlenstoffgehalt. Bis zu einem Kohlenstoffgehalt von 0,4 Ma.-% ist neben Bainit noch Ferrit ersichtlich. Mit weiter steigendem Kohlenstoffanteil nehmen die Martensitanteile (Plattenmartensit) zu. Erstmals sind geringe Mengen an Restaustenit zu sehen. Röntgenkristallografische Untersuchungen an den Proben zeigen das Auftreten einer flächenzentrierten kubischen (fcc) Phase oberhalb eines Kohlenstoffgehalts von 0,5 Ma.-% (vgl. Abbildung 83).

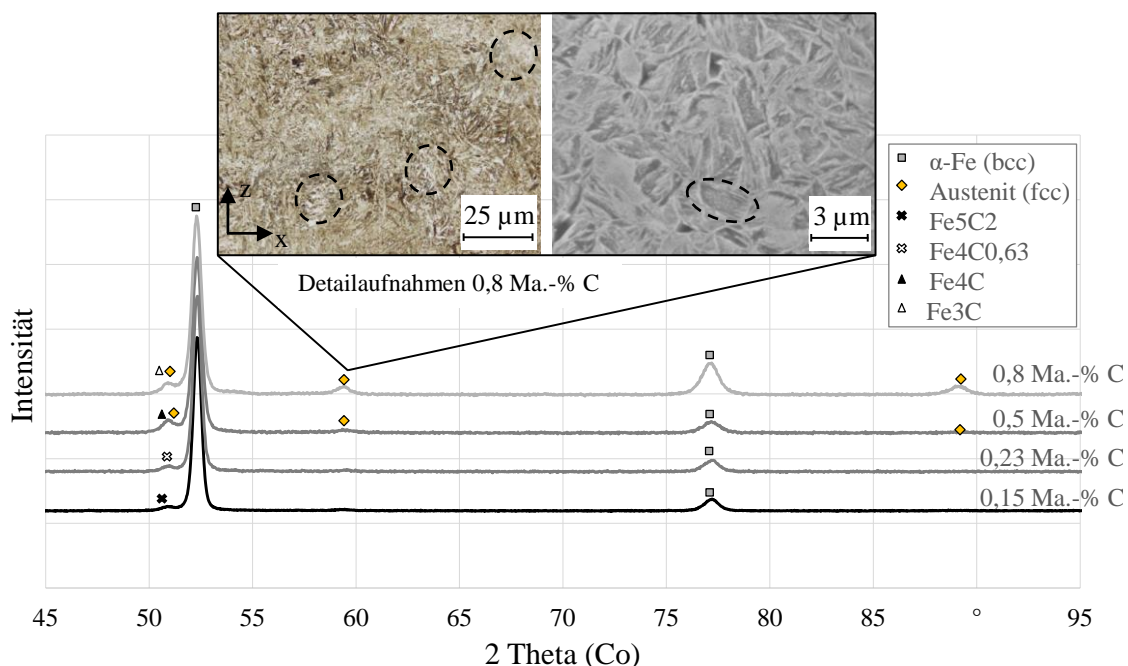


Abbildung 83: Röntgenbeugungsdiagramm bei unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt mit Restaustenit bei 0,8 Ma.-% Kohlenstoffgehalt (bcc: kubisch-raumzentriert; fcc: kubisch-flächenzentriert)

Durch Anwendung der Rietveld-Methode kann ein Restaustenitgehalt von ca. 10 % bei 0,8 Ma.-% C abgeschätzt werden. Der Austenitgehalt liegt an der unteren

## **Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens**

---

Grenze von 10 bis 25 % wie aus der Literatur von einsetzungshärtetem 16MnCr5 hervorgeht (BURKART ET AL. 2011). Zusätzlich zur Röntgenbeugung sind Detailaufnahmen der Probe mit 0,8 Ma.-% Kohlenstoff, die mittels Lichtmikroskop und dem REM aufgenommen wurden, in Abbildung 83 eingefügt. Die Aufnahmen bestätigen die vorherigen Befunde, indem Restaustenit nun sichtbar ist (Markierung Lichtmikroskopaufnahme) und ein hauptsächlich martensitisches Gefüge aufweist (GOTTWALT 2019).

Die REM-Aufnahme zeigt Karbide (Markierung), die sich während des Laser-Strahlschmelzprozesses gebildet haben. Festzuhalten ist, dass die Verarbeitung der Materialmischung mit 0,8 Ma.-% Kohlenstoff ohne erhöhte Porosität oder Rissbildung erfolgen kann. Es entsteht ein martensitisches Gefüge mit geringen Restaustenit-Anteilen in vergleichbaren Größenordnungen zum Einsatzhärten trotz der schnellen Abkühlung während des Laser-Strahlschmelzens.

### **8.3.2 Resultierende Materialeigenschaften des Werkstoffs hergestellt durch In-situ-Legieren**

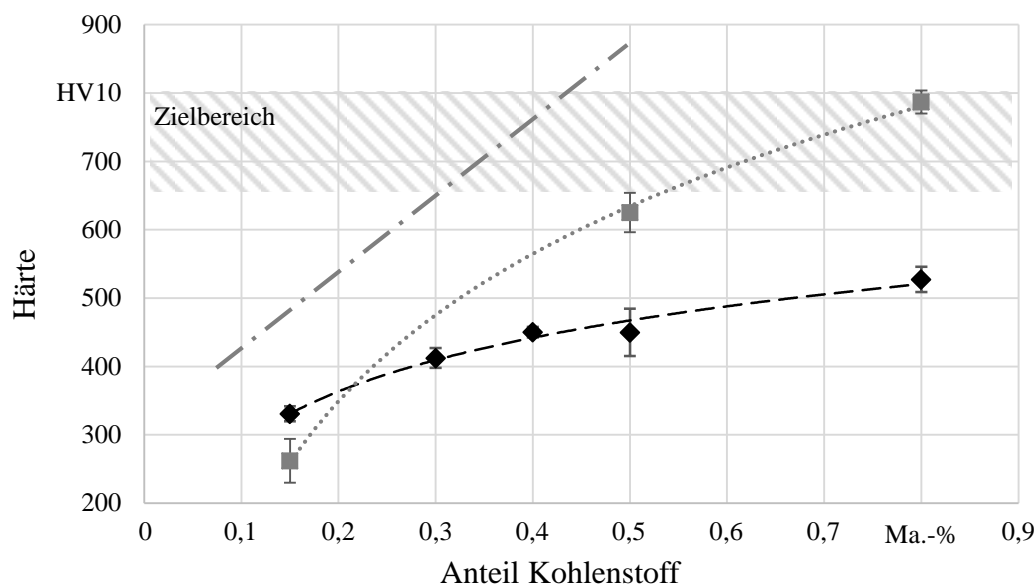
Nach der qualitativen Bewertung des Gefüges werden die mechanischen Eigenschaften der resultierenden Bauteile ermittelt. Dazu wird die Härte im Querschliff bestimmt und mit der maximal erzielbaren Härte von Stahl mit diesem Kohlenstoffgehalt verglichen. Die Vergleichsgerade wird nach LIEDTKE wie folgt bestimmt (LIEDTKE 2003):

$$\text{Härte}_{\max} = 32,87 + 83,86 \text{ Ma.-% C} - 49,75 (\text{Ma.-% C})^2 \text{ in HRC} \quad (6)$$

Die Härte im As-built-Zustand nimmt von 330 HV10 bei 0,15 Ma.-% C um ca. 200 HV10 auf 527 HV10 bei 0,8 Ma.-% C zu (siehe Abbildung 84).

Eine gute Annäherung wird über eine logarithmische Beschreibung ( $R^2 = 0,98$ ) erzielt. Die zunehmende Härte entspricht dem Wechsel von einem ferritischen zu einem bainitisch-martensitischem Gefüge. Allerdings ist die erzielbare Härte von 527 HV gering, was durch die Abweichung von der theoretisch erzielbaren Härte deutlich wird. Dies ist unter anderem auf den erhöhten Anteil von 10 % Restaustenit und Anlasseneffekte durch den schichtweisen Aufbau zurückzuführen.

## Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens



Zustand: ◆ As-built ■ Wärmebehandelt (WBH) — · theoretisches Maximum

Trendlinie As-built:  $y = m \cdot \ln(x) + c$ ;  $m = 113,4$ ;  $c = 545,9$  /  $R^2=0,98$

Trendlinie wärmebehandelt:  $y = m \cdot \ln(x) + c$ ;  $m = 311,3$ ;  $c = 850,0$  /  $R^2 = 0,99$

*Abbildung 84: Härte in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts vor und nach einer Wärmebehandlung (Erwärmung und Abschreckung)*

Der Zielwert der Randhärten von 660–800 HV nach ISO 6336-5 wird nicht erreicht. Deshalb wurde ein Härteprozess durchgeführt, um Anlasseffekte des schichtweisen Aufbaus zu eliminieren. Das Härten erfolgte ohne Aufkohlung bei der Einsatzhärte-temperatur von 16MnCr5 (Erwärmung auf 870 °C mit 5 °C pro Minute und Haltezeit für 50 Minuten mit anschließender Ölabschreckung) im Nabertherm-Ofen. Die Härte in den Proben mit höherem Kohlenstoffgehalte stieg deutlich an, während die Härte für den geringsten Kohlenstoffgehalt von 330 HV10 auf 261 HV10 (-21 %) abnahm. Eine vergleichbare Härteabnahme beobachteten ABDELWAHED ET AL. bei der Wärmebehandlung eines niedriglegierten Cr-Mo-Mn-Stahls und begründen dies mit einer eintretenden Kornvergrößerung bei der Wärmebehandlung im Vergleich zur feinen Kornstruktur im gebauten Zustand (ABDELWAHED ET AL. 2020). Dagegen steigt die Härte von 450 auf 620 HV10 (+37 %) bei 0,5 Ma.-% C und ändert sich von 527 auf 786 HV10 (+49%) bei 0,8 Ma.-% C. Die zugehörige Trendlinie kann durch eine logarithmische Approximation mit hoher Güte ( $R^2 = 0,99$ ) bestimmt werden. Der Schnittpunkt der beiden logarithmischen Regressionen liegt bei einem Kohlenstoffgehalt von 0,215 Ma.-% und einer Härte von etwa 370 HV10. Erst ab diesem Kohlenstoffgehalt führt eine Wärmebehandlung zu einer Härtesteigerung. Die erzielte Härte im Bereich von 0,8 Ma.-% C liegt mit 786 HV10 im Bereich der erzielbaren Härte eines

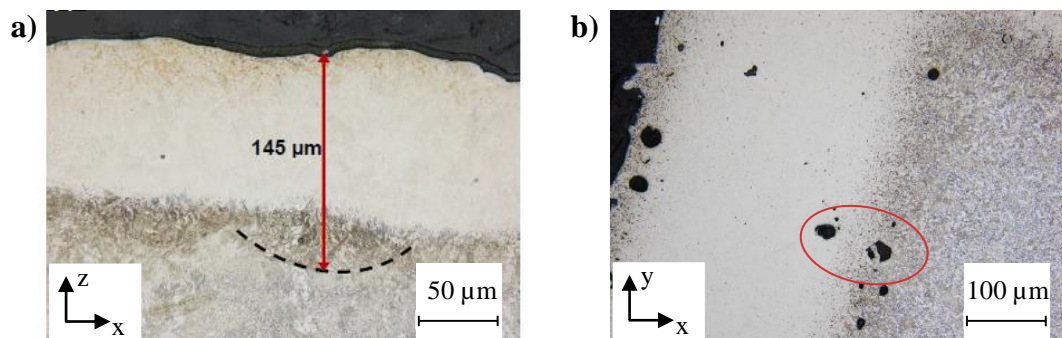
## Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens

konventionellen Einsatzhärteprozesses (BARGEL & SCHULZE 2018, KAFFENBERGER 2013). Die Zielhärte für Verzahnungen von 660–800 HV10 kann mit dem vorgestellten Prinzip der bereichsflexiblen Kohlenstoffanreicherung nach einem Härte- und Abschreckvorgang gut erreicht werden (TOBIE 2001). Die Zugfestigkeit der erzeugten Strukturen ist in Abbildung 104 des Anhangs dargestellt und ist mit den Kennwerten nach einem Einsatzhärten vergleichbar. Für eine vertiefte Diskussion der Materialkennwerte sei auf SCHMITT ET AL. 2021a verwiesen.

### 8.4 Multimaterialverarbeitung und Aufbaustrategien

Im nächsten Schritt wird der Materialübergang zwischen 16MnCr5 und dem Werkstoff mit erhöhtem Kohlenstoffanteil von 0,8 Ma.-% im Multimaterialprozess experimentell analysiert. Dabei wird nach ANSTAETT einerseits der Übergang in Aufbauebene, als auch der Übergang innerhalb einer Ebene untersucht (ANSTAETT 2020). Als Anlagentechnik wurde eine modifizierte SLM 250-Anlage der SLM Solutions AG eingesetzt und der 30  $\mu\text{m}$ -Parametersatz übertragen.

Die Verarbeitung der zwei Werkstoffe übereinanderliegend in z-Richtung zeigt keine Risse oder Poren im Übergangsbereich. In Abbildung 85 a) ist der vertikale Übergang ausgehend vom Grundwerkstoff 16MnCr5 zum Bereich mit 0,8 Ma.-% Kohlenstoff zu sehen.



*Abbildung 85: a) Vertikaler Übergang der Materialbereiche b) Horizontaler Übergang der Materialbereiche mit fehlerhafter Konturfahrt; geätzt mit 2 % Nital*

Eine Durchmischung im Übergang ist teilweise zu erkennen. Teil b) zeigt den Übergang innerhalb der Bauebene (xy-Ebene). Es sind vereinzelt Poren im Randbereich der Probe und im Übergangsbereich zu erkennen. Diese lassen sich auf



## Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens

eine Konturbelichtung mit erhöhtem Energieeintrag zurückführen. Im Werkstoffübergang ist eine geringe Durchmischung ohne Rissbildung erkennbar. Gleichzeitig liegt die relative Dichte der Proben mit Materialübergängen in vertikaler und horizontaler Richtung über dem Grenzwert von 99,5 % nach VDI 3405. Die Verarbeitung der Materialkombination 16MnCr5 und angereichertem 16MnCr5 mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,8 Ma.-% im Multimaterialprozess ist damit erfolgreich.

In den Schlifffbildern wird eine geringe Durchmischung der Werkstoffe im Übergangsbereich deutlich. Im nächsten Schritt wird der Härtegradient nach einem Härtevorgang bestimmt, der sich zwischen den unterschiedlichen Werkstoffbereichen ergibt. Die Erkenntnisse des vorherigen Kapitels zeigen, dass ein Härtevorgang notwendig ist, um die geforderte Oberflächenhärte für Verzahnungen zu erzielen. Es wird ersichtlich, dass im Bereich mit 0,8 Ma.-% Kohlenstoffgehalt eine Härte von ca. 700 HV erzielt wird, während im Grundwerkstoff mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,16 Ma.-% eine Härte von ca. 300 HV vorliegt. Die Härte des Grundwerkstoffs entspricht dabei den bekannten Kennwerten aus Kapitel 6. Zwischen den Bereichen ist ein gradierter Härteverlauf erkennbar. Da die Härte direkt mit dem Kohlenstoffverlauf verknüpft ist, ist von einem gradierten Kohlenstoffverlauf auszugehen. Dieser entsteht durch die Diffusion von Kohlenstoff aus dem kohlenstoffreichen 0,8 Ma.-% Kohlenstoffbereich zu dem kohlenstoffarmen 16MnCr5 Grundwerkstoff. Die vorliegende Diffusionszone entspricht dabei ca. 60  $\mu\text{m}$ , also zwei Schichtstärken (siehe Abbildung 86).

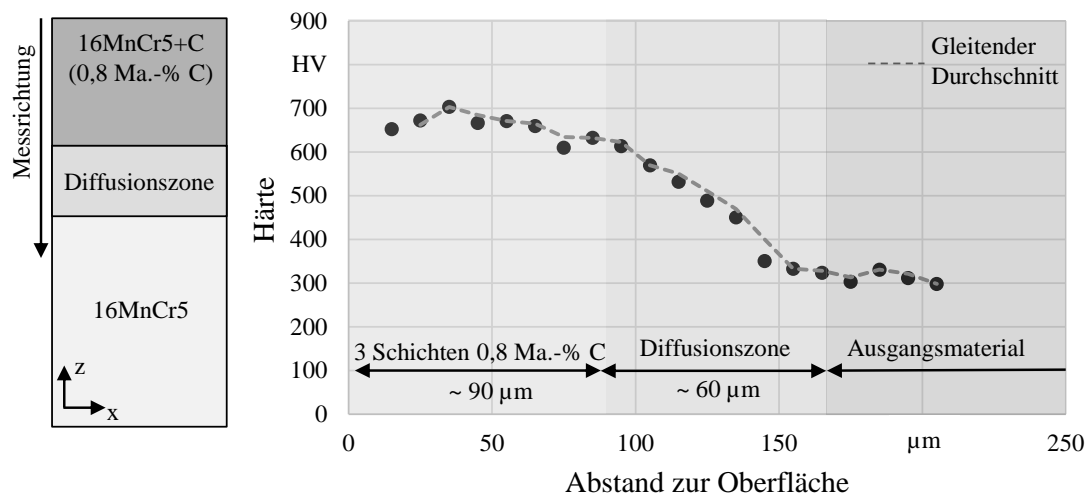


Abbildung 86: Härteverlauf einer Multimaterialprobe in vertikaler Richtung nach einem Härteprozess

## Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens

Die Diffusion des Kohlenstoffs wird durch erneutes Aufschmelzen der untenliegenden Schicht und der Wärmeleitung durch das Material begünstigt. Der Übergang zwischen Bereichen unterschiedlichen Kohlenstoffgehalts wird durch die Diffusion nicht diskret, sondern als gradiertes Bereich ausgebildet. Dies verringert auftretende Spannungsspitzen und entspricht einem Härteverlauf mit Ähnlichkeiten zu einem Aufkohlprozess (ZHANG ET AL. 2019, BARGEL & SCHULZE 2018).

Soll der Härtegradient über einen längeren Bereich gestreckt oder sollen weitere (Zwischen-)Härten gezielt eingestellt werden, so kann eine voxelbasierte Materialverteilung genutzt werden. Die bisher verwendete Ablage basiert darauf, dass ein großer Bereich des Bauteils aus dem Grundwerkstoff 16MnCr5 und ein zweiter ebenfalls größerer Bereich aus dem zweiten mit Kohlenstoff angereicherten Werkstoff besteht. Zwischen den Bereichen stellt sich durch die Kohlenstoffdiffusion ein gradiertes Härteverlauf ein. Durch die Verringerung der Werkstoffbereiche bis auf Voxelgröße (in Abhängigkeit der Anlagentechnik und Schichtstärke) und die angepasste Anordnung könnten unter Ausnutzung der Kohlenstoffdiffusion Bereiche mit beispielhaft 0,3 oder auch 0,5 Ma.-% Kohlenstoff erzeugt werden (siehe Abbildung 87).

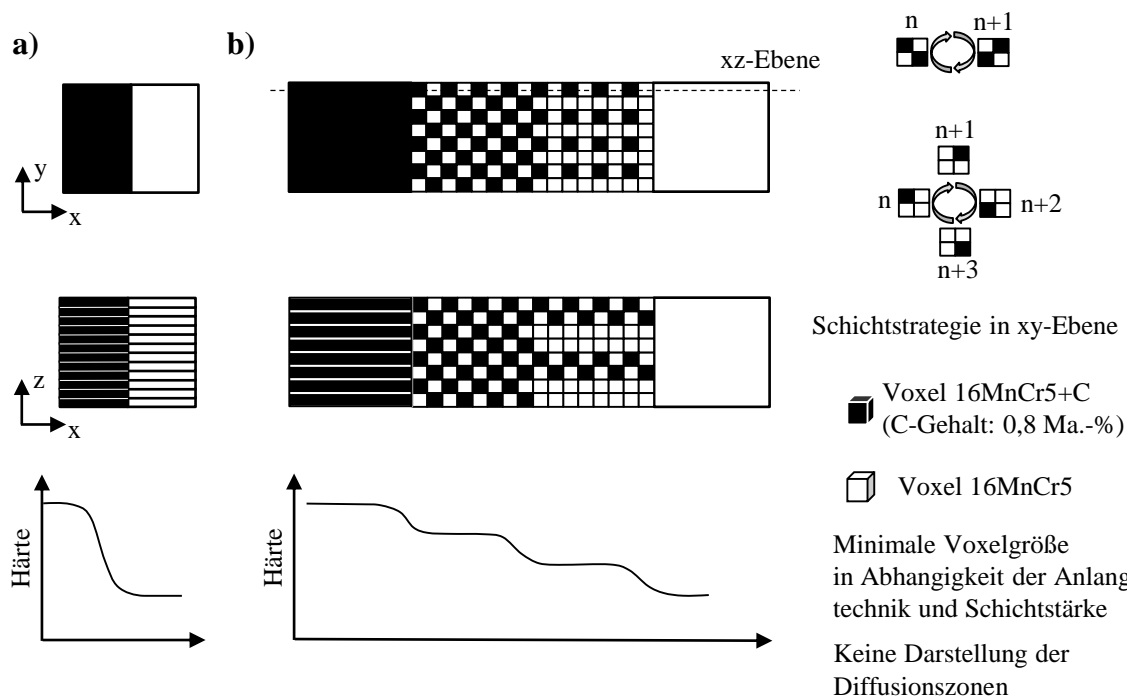


Abbildung 87: Übersicht möglicher Materialverteilungen a) Flächige Verteilung der Werkstoffe b) Voxelbasierte Verteilung der Werkstoffe

Durch die vorgestellte voxelbasierte Materialverteilungsstrategie können die Härte in Bauteilbereichen und der Härteverlauf zwischen den Bauteilbereichen flexibel

## **Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens**

---

eingestellt werden, ohne dass ein dritter oder vierter Werkstoff verwendet werden muss.

Der jeweilige Kohlenstoffgehalt in der voxelbasierten Ablage lässt sich mit Formel 14 in Abhängigkeit der Volumenanteile vom 16MnCr5 Grundwerkstoff und dem mit Kohlenstoff angereicherten Werkstoff bestimmen:

$$\text{C-Gehalt } V_{\text{Gesamt}} = \frac{0,16 \cdot V_{16\text{MnCr5}} + 0,8 \cdot V_{16\text{MnCr5+C}}}{V_{\text{Gesamt}}} \text{ Ma.-%}$$

$V_{\text{Gesamt}}$ : Gesamtvolumen (14)

$V_{16\text{MnCr5}}$ : Volumen aus 16MnCr5

$V_{16\text{MnCr5+C}}$ : Volumen aus 16MnCr5 mit Kohlenstoff.

Die voxelbasierte Materialverteilung erfordert mit aktuellen Softwarelösungen eine sehr aufwändige Datenvorbereitung. Die Aufbauzeit wird bei der Verwendung eines vollflächigen oder maskenbasierten Auftragsmechanismus nicht weiter erhöht (SCHNECK ET AL. 2021). Bei der Verwendung eines düsenbasierten Auftragsmechanismus steigt die Ablagezeit an.

### **8.5 Verzahnung mit bereichsflexiblem Kohlenstoffgehalt**

Im nächsten Schritt wird eine Verzahnung aufgebaut, die gleichzeitig einen optimalen Härtetiefenverlauf im Zahnfuß (hier CHD = 0,8 mm) und auf der Zahnflanke (hier CHD = 1,2 mm) hat. Dies erlaubt eine Optimierung der Tragfähigkeit und ist im konventionellen Einsatzhärten nicht gleichzeitig erzielbar (TOBIE 2001).

Ein Ausschnitt der Verzahnung und der Härteverlauf nach einem Härtevorgang ist in Abbildung 88 zu sehen und zeigt, dass die bereichsflexible Ablage von mit Kohlenstoff angereichertem Material in der Randzone erfolgreich durchgeführt wurde.

## Bereichsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts durch Einsatz des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens

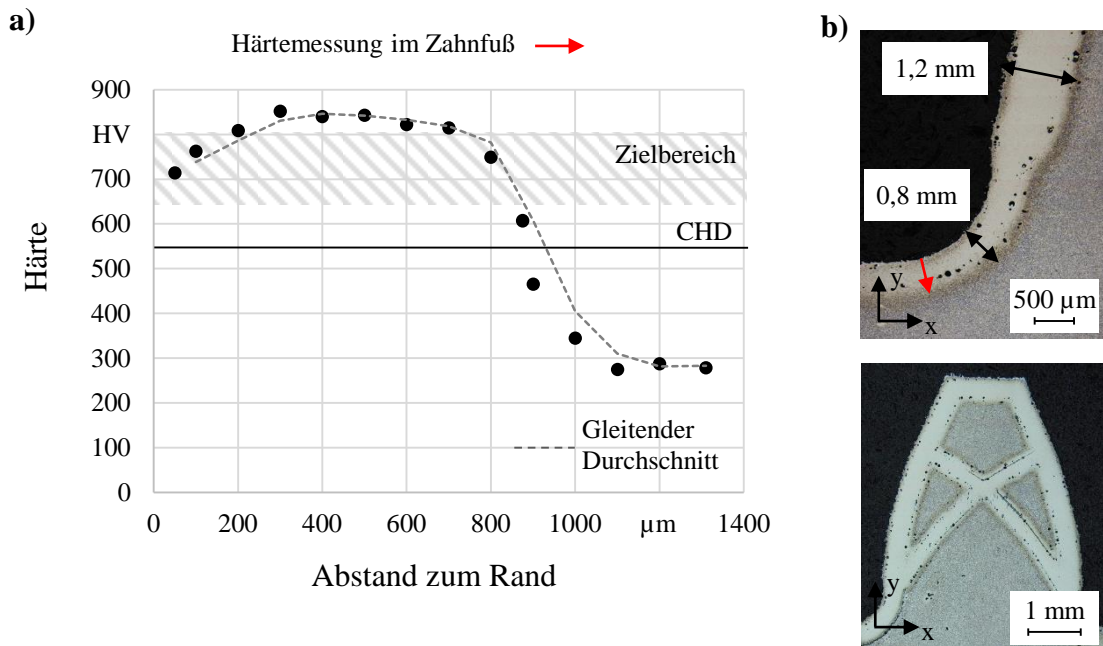


Abbildung 88: a) Härteverlauf im Zahnfuß nach bereichsflexibler Werkstoffablage und Härtevorgang b) Beispiele für Gestaltungsfreiheit durch die Multimaterialbauweise

Die erzielte Einsatzhärte im Zahnfuß beträgt 0,91 mm. Die Ziel-Einsatzhärte wurde damit geringfügig übertroffen. Die erzielte Randhärte liegt im Bereich von 700 bis 834 HV. Die Anforderungen für Verzahnungen der MQ- und ME-Klasse nach ISO 6336-5 werden damit erfüllt, teilweise wird die maximale Randhärte von 800 HV sogar überschritten. Durch ein anschließendes Anlassen kann die Härte noch reduziert werden, um die Anforderung vollständig zu erfüllen.

Zusätzlich ermöglicht es die lokale Ablage, Leichtbaustrukturen nicht aufzukohlen, um eine Versprödung wie beim Einsatzhärten zu vermeiden. Dadurch kann die Gestaltungsfreiheit für AM-Leichtbauverzahnungen um eine weitere Dimension erweitert werden. Außerdem können innenliegende Versteifungen (siehe Abbildung 88 b)) und gradierte Übergänge erzeugt werden, die ansonsten nicht fertigbar sind. Solche innenliegenden Versteifungsstrukturen rücken gerade erst in den Fokus der Forschung und Tragfähigkeitsverbesserungen müssen noch evaluiert werden.

### **8.6 Fazit**

Im Rahmen dieses Kapitels wurde die Kombination der Verfahren des Multimaterial-Laser-Strahlschmelzens und des In-situ-Legierens für die Anwendung in Verzahnungen evaluiert.

Bei einer theoretischen Betrachtung zeigen sich große Vorteile in der freien Einstellung der Einsatzhärtetiefen in Zahnfuß und -flanke, der Vermeidung des Durchkohlens von Leichtbaustrukturen und der Verbesserung der Einsatzhärtetiefentoleranz aus dem konventionellen Einsatzhärten. In Kombination ergeben sich daraus neue Freiheiten in der Bauteilkonstruktion. Dazu wurde demonstriert, dass Pulvermischungen mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,8 Ma.-% ohne Poren und Risse verarbeitet werden können und sowohl die Anforderungen an Randhärte (700–800 HV10) als auch an den Härtetiefenverlauf von Verzahnungen erfüllt werden können. Es konnte gezeigt werden, dass weder in vertikalen, noch in horizontalen Werkstoffübergängen Risse oder Poren auftreten. Durch die auftretende Kohlenstoffdiffusion bei der Verarbeitung höherliegender Schichten entsteht ein gradierter Härteverlauf. Unter Nutzung der Kohlenstoffdiffusion und voxelbasierter Materialverteilung können weitere Härtebereiche und -verläufe eingestellt werden. Allerdings hat sich erwiesen, dass ein Härteprozess weiterhin notwendig ist, um die geforderten Härten am Rand zu erreichen. Auf das Aufkohlen kann verzichtet werden und ein einfacher Härteprozess reduziert die Prozesszeit deutlich, da kein Aufkohlen über 6–10 Stunden notwendig ist. Insgesamt besitzt das gezeigte In-situ-Legieren von kohlenstoffhaltigen Pulvermischungen in Kombination mit dem Multimaterialprozess ein hohes Anwendungspotenzial und ein erster Verzahnungsdemonstrator wurde im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut. Ausstehend sind die Umsetzung auf einer industriellen Anlagentechnik und die Ermittlung von Tragfähigkeiten von Verzahnungen mit ortsflexibler Kohlenstoffverteilung. Ebenso steht eine wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens aus, da das Kohlenstoffpulver hohe Kosten hat und der Multimaterialprozess eine geringere Produktivität aufweist.

## 9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die bauweisenspezifische Entwicklung von Fertigungsparametersätzen sowie die resultierenden Material- und Bauteileigenschaften wurden in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben. Im diesem Abschnitt werden nun verschiedene Leichtbauweisen im Hinblick auf die anwendbaren Fertigungsparametersätzen und notwendige Prozessketten zur Erreichung spezifischer Zielwerte (z. B. Oberflächenrauigkeit) verglichen sowie die resultierenden Produktionskosten in Abhängigkeit von der Stückzahl ermittelt. Die frühzeitige Verknüpfung des Bauteildesigns mit den resultierenden Produktionskosten stellt einen elementaren Bestandteil der *Design-to-Cost*-Methodik dar (XIAOCHUAN ET AL. 2004, EHRENSPIEL ET AL. 2007). Insbesondere Ansätze des *Design-for-Manufacturing* und *Design-for-Assembly* besitzen hohes Potenzial, Mehrkosten im Herstellungsprozess zu vermeiden. Zusätzlich werden die Produktionskosten eines schmelzmetallurgisch hergestellten Zahnrads ohne Leichtbaukonstruktion als Referenz berechnet. Die Ergebnisse erlauben eine Analyse der Kostenstrukturen und die Bewertung der Leichtbauweisen aus ökonomischer Perspektive.

Mehrwerte in der Nutzungsphase werden in dieser szenariobasierten Betrachtung nicht berücksichtigt, da eine Quantifizierung nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgen kann und diese je nach Anwendungsfall und Unternehmen unterschiedlich ausfällt. Für eine Quantifizierung von AM-Mehrwerten sei an dieser Stelle auf SCHNECK 2021 verwiesen.

### 9.1 Analyse der Leichtbauweisen und Auswahl geeigneter Prozessketten

In der szenariobasierten Betrachtung dienen vier Leichtbauweisen in umgesetzten Verzahnungen als Anwendungsbeispiel. Die Bauweisen unterscheiden sich im Grad des umgesetzten Leichtbaus und der dazu angewandten Strukturen. Sie besitzen vergleichbare rechnerische Sicherheitsfaktoren gegen plastische Verformung im Zahnradkörper. Für Details zur Auslegung und Berechnung wird auf Abschnitt 4.3 und SCHMITT ET AL. (2019a) verwiesen. Die Varianten stellen vier Stufen im Leichtbaudesign unter Anwendung von bionischen Konstruktionsprinzipien, Topologieoptimierung und Gitterstrukturen dar:






- Leichtbauvariante 1: Masseinsparung von 30 % durch die Anwendung von bionischen Konstruktionsprinzipien; hohe Flächenquerschnitte in den Leichtbauelementen und hoher Anteil an Stützstrukturen.

- Leichtbauvariante 2: Masseinsparung von 35 % durch die Anwendung einer Topologieoptimierung; mittlere Flächenquerschnitte in den Leichtbauelementen und geringer Anteil an Stützstrukturen.
- Leichtbauvariante 3: Masseinsparung von 44 % durch die Anwendung bionischer Konstruktionsprinzipien; geringe Flächenquerschnitte in den Leichtbauelementen und geringer Anteil an Stützstrukturen.
- Leichtbauvariante 4: Masseinsparung von 57 % durch die Anwendung von Gitterstrukturen im Zahnradkörper; geringste Flächenquerschnitte ( $\sim 1$  mm) und geringer Anteil an Stützstrukturen.

Unter der Annahme, dass alle Leichtbauvarianten mit gleichen Fertigungsparametersätzen im Laser-Strahlschmelzen und in der Prozesskette gefertigt werden, besitzt Variante 4 die geringsten Fertigungskosten. Diese als **Leichtbauökonomie** bekannte Eigenschaft der additiven Fertigung wird detailliert von KAMPS 2018 beschrieben.

Werden allerdings die Fertigungsparametersätze im Laser-Strahlschmelzen und die Prozesskette an die jeweilige Bauweise der Variante angepasst, wie es in dieser Arbeit vorgeschlagen wird, entstehen komplexe Wechselwirkungen aus erzielbarer Aufbaurate des Fertigungsparametersatzes, zu verfestigender Bauteilmasse (Masseinsparung) und notwendiger Prozesskettenschritte. Dies wird im Folgenden für die vier Varianten und eine schmelzmetallurgische Referenzverzahnung untersucht. Dabei wird angenommen, dass Variante 1 mittels eines  $80\ \mu\text{m}$ -Fertigungsparametersatzes hergestellt wird, da hohe Flächenquerschnitte vorliegen. Um die Oberflächenrauigkeit zu reduzieren (vgl. Abschnitt 5.3), wird der Prozess des chemischen Polierens in die Prozesskette integriert, der eine globale Reduktion der Oberflächenrauigkeit auf  $Ra\ 10\ \mu\text{m}$  verspricht (ŁYCZKOWSKA ET AL. 2014). Variante 2 besitzt mittlere Flächenquerschnitte und kann durch den ermittelten  $50\ \mu\text{m}$ -Fertigungsparametersatz hergestellt werden. Ein anschließendes chemisches Polieren findet nicht statt. Weitere Masseinsparungen sind durch die Reduzierungen der Flächenquerschnitte erzielbar, die in Variante 3 umgesetzt sind. Diese Variante ist durch dünne Querschnitte und Überhänge nur mittels des  $30\ \mu\text{m}$ -Fertigungsparametersatzes herstellbar. Die höchste Masseinsparung ist mit Variante 4 erzielbar. Um ein Durchhärten und damit eine Versprödung der Gitterstrukturen zu verhindern, wird das vorgestellte In-situ-Legieren in Kombination mit einer Multimaterialfertigung (vgl. Abschnitt 8) eingesetzt. Ein Einsatzhärten ist für diese Variante nicht notwendig. Alle Varianten werden spannungsarm gegläht, von der Bauplatte erodiert, der Support wird spanend entfernt und ein Schleifen der Bohrung, der Nabe und der Zahnflanken durchgeführt. Der Anteil an

entferntem Support nimmt von Variante 1 zu 4 stetig ab. Eine Übersicht der Varianten und der zugehörigen Fertigungsparametersätze sowie der jeweiligen Prozesskette ist in Abbildung 89 dargestellt.

Referenz	Leichtbau- variante 1	Leichtbau- variante 2	Leichtbau- variante 3	Leichtbau- variante 4
				
$\Delta m$ : 0 % Wälzfräsen	$\Delta m$ : -30 % 80 $\mu\text{m}$ -Parametersatz	$\Delta m$ : -35 % 50 $\mu\text{m}$ -Parametersatz	$\Delta m$ : -44 % 30 $\mu\text{m}$ -Parametersatz	$\Delta m$ : -57 % 30 $\mu\text{m}$ -Parametersatz
Trennen	Laser-Strahlschmelzen	Laser-Strahlschmelzen	Laser-Strahlschmelzen	<b>Multimaterial</b> Laser-Strahlschmelzen
Drehen	Spannungsarmglühen	Spannungsarmglühen	Spannungsarmglühen	Spannungsarmglühen
Wälzfräsen	Erodieren	Erodieren	Erodieren	Erodieren
	Supportentfernung	Supportentfernung	Supportentfernung	Supportentfernung
	<b>Chemisches Polieren</b>			
Einsatzhärten	Einsatzhärten	Einsatzhärten	Einsatzhärten	Härten
Schleifen	Schleifen	Schleifen	Schleifen	Schleifen

*Abbildung 89: Übersicht der Fertigungsparametersätze und der resultierenden Prozesskette in Abhängigkeit von der Bauweise der Leichtbauverzahnungen*

Als Referenz dient eine Prozesskette aus schmelzmetallurgischer Materialherstellung und Zerspanung. Schmelzmetallurgische Verzahnungen, insbesondere die hier angewandte automobiltypische Baugröße, werden in großen Stückzahlen kostengünstig hergestellt. Für den Vergleich werden dennoch die Werkzeugkosten vollumfänglich zugeschrieben, wie es sonst bei Sonderverzahnungen in kleinen Stückzahlen üblich ist.

## 9.2 Analyse der Herstellungskosten

Übergeordnet liegen der Kostenkalkulation die im Folgenden beschriebenen Annahmen zu Grunde. Die Anlagennutzung beträgt sieben Jahre im Zweischicht-Betrieb mit 220 Tagen pro Jahr. Laser-Strahlschmelzanlagen können mannlos betrieben werden und benötigen keine dauerhafte Bedienung oder Überwachung durch Fertigungspersonal während des Laser-Strahlschmelzvorgangs. Personalkosten für einen Techniker werden mit 40 €/Stunde berücksichtigt. Sowohl die spanende Fertigung als auch das Laser-Strahlschmelzen benötigen eine von einer Technikerin durchgeführte Datenvorbereitung als CAM-Programmierung bzw. Schichtdatenerzeugung. Es wird ein Zinssatz von 8 % angenommen, während Mietkosten



von 43 €/Jahr pro Quadratmeter und Energiekosten von 0,165 €/kWh einbezogen werden (BREITKOPF (2021)).

Als Basis zur Berechnung der Fertigungskosten des Laser-Strahlschmelzens dient das Kostenmodell von KAMPS ET AL. (TOBIAS KAMPS 2018, KAMPS ET AL. 2018, KAMPS 2018) und die Kosten der Multimaterial-Fertigung werden nach den Vorgaben von ANSTÄTT (ANSTAETT 2020) berechnet. Beide Modelle werden um die in dieser Arbeit ermittelten tatsächlichen Aufbauraten der Parametersätze unterschiedlicher Schichtstärken ergänzt (vergleiche Abschnitt 5.3) und aktualisierte Kostenparameter für weitere Bearbeitungsschritte wie Wärmebehandlungen oder chemisches Polieren aus Industrieanfragen genutzt. Als Berechnungsgrundlage dient eine Quad-Laser-Anlage (4x 400 Watt) nach dem Stand der Technik (Anlagenkosten: 1.722.000 €) mit einer Verfügbarkeit von 7008 h/Jahr (80 % Verfügbarkeit einer mannlosen Anlage). Damit ergibt sich ein Maschinenstundensatz von 57,99 €. Pulverkosten werden nach aktuellen industriellen Angeboten mit 25 €/kg für Einsatzstahl für Mengen von 50–200 kg angenommen, was signifikant unter den Annahmen von KAMPS 2018 liegt. Reinstes Kohlenstoffpulver (99,99 % Reinheit) für den Multimaterial-Prozess wird nach Angeboten mit 4.360 €/kg in der Kalkulation berücksichtigt. Der verfügbare Bauraum wird mit weiteren Bauteilen belegt, wie es in der industriellen AM-Fertigung eines Dienstleisters üblich ist. Den Verzahnungen werden also anteilige Kosten der Plattenbelegung zugewiesen. Alle weiteren Daten wie Pulververluste oder Rüstzeiten zur Berechnung der Kosten des Laser-Strahlschmelzens sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Die Herstellkosten werden für das Produktionsszenario einer Auftragsfertigung der vorgestellten Verzahnung für den Rennsport im Stückzahlbereich 1 bis 30 berechnet. Die **Kosten** der jeweiligen Prozesskettenschritte werden mit  $K_{\text{Prozessschritt}}$  abgekürzt. Die Prozessschrittkosten ergeben sich aus Material-, Maschinen- und Personalkosten. Kosten für Qualitätssicherung, Transport oder unternehmensspezifische Zuschläge werden nicht ermittelt, da diese anwendungsspezifisch und unternehmensindividuell sind. Damit resultieren aus der Summe der Prozessschrittkosten die Herstellungskosten.

*Tabelle 17: Parameter zur Kostenmodellierung im Laser-Strahlschmelzen*

	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Quelle</b>
<b>Laser-Strahlschmelzen</b>	Anlagenkosten	1.722.000 €	Angebot
	Peripheriekosten	150.000 €	Angebot
	Pulverkosten Einsatzstahl	25 €/kg	Angebot
	Anlagenverfügbarkeit	7008 h	Erfahrungswert
	Zinskosten	8 %	Eigene Annahme
	Wartungskosten pro Jahr (Fixanteil)	50.000 €	Erfahrungswert
	Warmmiete pro Jahr	43 €/m <sup>2</sup>	Eigene Annahme
	Fläche	30 m <sup>2</sup>	Spezifikation
	Energiekosten	0,165 €/kWh	BREITKOPF 2021
	Aufbaurate	33,4; 64,8; 100,8 cm <sup>3</sup> /h	Abschnitt 5.2.2
	Beschichtungszeit	7 s/Schicht	SCHNECK 2021
	Schutzgaskosten (Argon)	2,14 €/m <sup>3</sup>	Angebot
<b>Multi-material</b>	Pulverkosten Kohlenstoff	4.360 €/kg	Angebot
	Schichtzeit	Verdopplung	ANSTAETT 2020
<b>Pre- und Post-prozess</b>	Rüstzeit	0,5 h	Eigene Messung
	Anteil Pulververluste	57 % des verfestigten Volumens	(LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2016)

Für die Leichtbauvarianten 1 bis 3 (LB1-3, siehe Abbildung 89) wird ein industrieller Prozess des Laser-Strahlschmelzens mit den Aufbauraten von 100,8 (LB1), 64,8 (LB2) und 33,4 (LB3) cm<sup>3</sup>/h angesetzt. Die zunehmende geometrische Bauteilkomplexität bedingt einen Parametersatz mit niedriger Schichtstärke. Für Variante 4 wird eine Multimaterialfertigung mit In-situ-Legieren angewandt. Hierzu

## Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

---

kann mit doppelter Bauzeit im Bereich der Zähne gerechnet werden, da jede Schicht einmal je Material belichtet werden muss. Zur Kohlenstoffanreicherung eines Kilogramms 16MnCr5 auf ca. 0,8 Ma.-% Kohlenstoff sind 8 g Kohlenstoffpulver notwendig. Bei Pulverkosten von 4.360 €/kg des Kohlenstoffpulvers und 25 €/kg des 16MnCr5 Pulvers ergeben sich Pulverkosten von 59,88 €/kg. Dieses Pulver wird nur in geringen Mengen im Bereich der Zähne eingesetzt. Mit diesen Parametersätzen ergeben sich die jeweiligen  $K_{LBM}$ .

Allen Varianten aus dem Laser-Strahlschmelzen werden auf der Bauplattform spannungsarmgeglüht, was nach Angeboten mit 0,84 €/kg berechnet wird. Zu berücksichtigen ist, dass neben den Bauteilen auch die Masse der Bauplattform von 15 kg berechnet wird und in die  $K_{Spannungsarmglühen}$  einfließt. Die Parameter zur Kostenmodellierung der Wärmebehandlungsschritte sind in Tabelle 18 aufgeführt.

*Tabelle 18 Parameter zur Kostenmodellierung nachgelagerter Prozessschritte*

Parameter	Wert	Quelle
Spannungsarmglühen	0,84 €/kg	Angebot
Erodieren	0,23 €/mm Schnittweg	Angebot
Einsatzhärten	4 €/kg	Angebot
Härten	1 €/kg	Angebot
Chemisches Polieren	50 €/Bauteil	Angebot

Anschließend erfolgt ein Erodieren (0,23 €/mm Schnittweg) der Bauteile von der Bauplattform. Dieser Prozess wird auf Grund des geringeren Aufmaßes und der glatteren Trennebene gegenüber der Nutzung einer Bandsäge bevorzugt und ergibt die  $K_{Erodieren}$ . Ebenso wird die Wiederaufbereitung der Bauplattform von 50 €/Bauplattform diesen Kosten zugeordnet.

Darauf folgt eine drehende Entfernung des Supports. Dies wird mit einem Maschinenstundensatz von 15 €/h berechnet. Die Masse des Supports reduziert sich von Variante 1 zu Variante 4 stetig. Damit sinkt die Bearbeitungszeit von 20 (LB1) auf 13,2 (LB2), auf 11,9 (LB3) und schlussendlich auf 9,3 min (LB4) und ergibt den variablen  $K_{Support}$ .

Leichtbauvariante 1 wird danach einem chemischen Polieren unterzogen, um die Oberflächenrauigkeit des 80  $\mu\text{m}$ -Fertigungsparametersatzes entgegenzuwirken. Nach industriellen Angeboten wird mit  $K_{\text{chem. Polieren}}$  von 50 €/Bauteil gerechnet.

Die Kosten für das Einsatzhärten werden industriellen Angeboten entsprechend mit 4 €/kg angenommen und reduzieren sich nicht, da die Außenmaße der Verzahnungen unverändert sind und eine höhere Ofenbelegung verhindern. Für die Leichtbauvariante 4 wird ein einfacher Härteprozess (1 €/kg) angenommen, da ein Aufkohlen durch das In-situ-Legieren überflüssig wird. Damit ergeben sich die  $K_{\text{Einsatzhärten}}$  und  $K_{\text{Härten}}$ .

Anschließend werden die Verzahnungen von allen Leichtbauvarianten geschliffen. Dabei wird von 90 Minuten CAM-Programmierung durch einen Techniker und jeweils 15 Minuten Bearbeitungszeit für die Prozesse Rüsten, Rundschleifen, Flachsleifen und Verzahnungsschleifen ausgegangen. Der Maschinenstundensatz beträgt 120 €/h und führt zu  $K_{\text{Schleifen}}$  (BOUQUET ET AL. 2014).

Nach den jeweiligen Prozessketten ergeben sich damit je nach Variante die Gesamtkosten:

$$K_{\text{LB1}} = K_{\text{LBM}_{80 \mu\text{m}}} + K_{\text{Spannungsarmglühen}} + K_{\text{Erodieren}} + K_{\text{Support}} + K_{\text{chem. Polieren}} + K_{\text{Einsatzhärten}} + K_{\text{Schleifen}}$$

$$K_{\text{LB2}} = K_{\text{LBM}_{50 \mu\text{m}}} + K_{\text{Spannungsarmglühen}} + K_{\text{Erodieren}} + K_{\text{Support}} + K_{\text{Einsatzhärten}} + K_{\text{Schleifen}}$$

$$K_{\text{LB3}} = K_{\text{LBM}_{30 \mu\text{m}}} + K_{\text{Spannungsarmglühen}} + K_{\text{Erodieren}} + K_{\text{Support}} + K_{\text{Einsatzhärten}} + K_{\text{Schleifen}}$$

$$K_{\text{LB4}} = K_{\text{LBM}_{\text{MM}}} + K_{\text{Spannungsarmglühen}} + K_{\text{Erodieren}} + K_{\text{Support}} + K_{\text{Härten}} + K_{\text{Schleifen}}$$

Die Prozesskette der schmelzmetallurgischen Vergleichsvariante wird analog aufgestellt und die Prozesskosten werden ermittelt. Zuerst wird Material (8 €/kg) von einer Stangenware abgetrennt, wodurch sich die Kosten von  $K_{\text{Trennen}}$  ergeben. Aus diesem Material wird ein Rohling drehend erzeugt ( $K_{\text{Drehen}}$ ). Die Zeiten und der Maschinenkostensatz können der LBM-Prozesskette entnommen werden.

Für die Verzahnungsherstellung wird das Wälzfräsen angenommen, da es sich um ein vielseitiges Verfahren (Zahnform, Schrägungswinkel und Verzahnungsbreiten) handelt, das durch günstige Kraftverhältnisse eine hohe Genauigkeit der Verzahnung sicherstellt (KLOCKE & BRECHER 2017). Basierend auf den Daten von BOUQUET ET AL. werden 90 min CAM-Programmierung (Technikerin), 1000 € Werkzeugkosten und 20 min Bearbeitungszeit bei einem Maschinenstundensatz von 120 €/h angenommen. Die Werkzeugkosten werden den geringen Stückzahlen der Sonderverzahnung vollumfänglich zugeschrieben. Damit ergeben sich die  $K_{\text{Wälzfräsen}}$ .

Die Kosten der Prozesse Einsatzhärten ( $K_{\text{Einsatzhärten}}$ ) und Schleifen ( $K_{\text{Schleifen}}$ ) können aus der Prozesskette der laser-strahlgeschmolzenen Leichtbauvarianten übernommen werden.

Insgesamt ergeben sich damit Herstellungskosten der schmelzmetallurgischen Vergleichsvariante zu:

$$K_{\text{Spanen}} = K_{\text{Trennen}} + K_{\text{Drehen}} + K_{\text{Wälzfräsen}} + K_{\text{Einsatzhärten}} + K_{\text{Schleifen}}$$

Die entstehenden Kosten pro Verzahnung in Abhängigkeit von Stückzahl, Fertigungsverfahren und Leichtbauvariante werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

### 9.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der Leichtbauweise

Auf Basis der vorgestellten Annahmen werden für die Leichtbauvarianten und die schmelzmetallurgische Referenz die Fertigungskosten pro Rad bei einer Stückzahl von 1-30 berechnet. Im Vergleich zur klassischen Kostenbewertung von Leichtbaulösungen und der Leichtbauökonomie ist zu beachten, dass im vorgestellten Kostenvergleich die erzielbare Massereduktion mit dem Fertigungsparametersatz (Aufbaurate) und der Prozesskette bauweisenspezifisch verknüpft ist (KAMPS 2018, HENNING & MOELLER 2020). Es ergibt sich eine heterogene Betrachtungsweise der Fertigungskosten und der erzielbaren Massereduktion, wie in Abbildung 90 dargestellt.

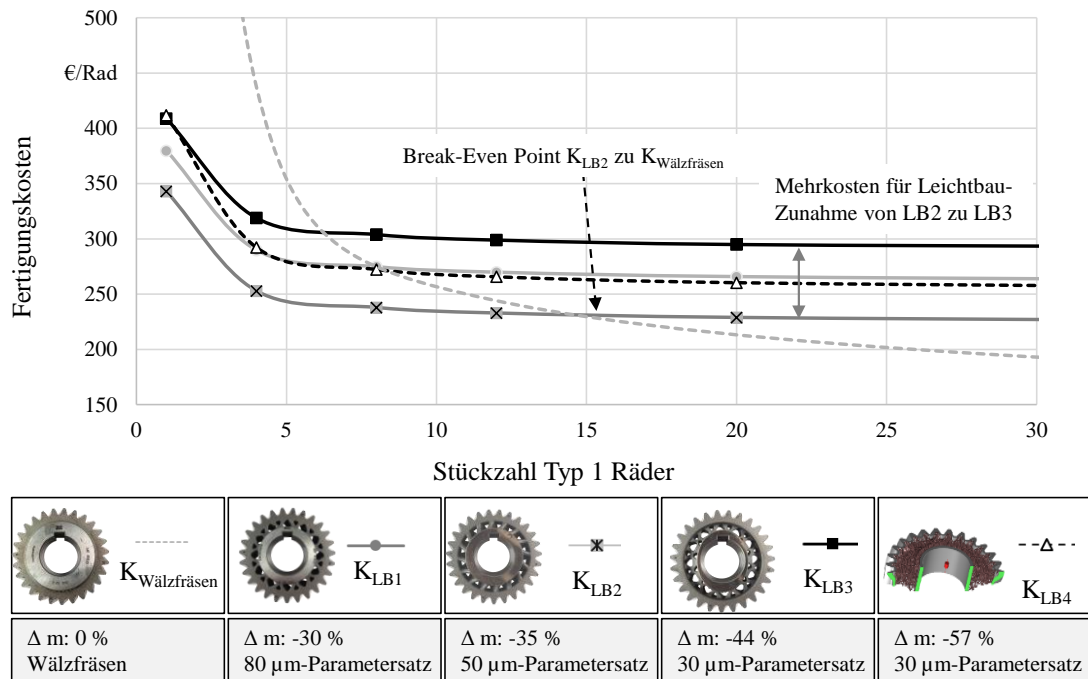


Abbildung 90: Vergleich der Fertigungskosten je Leichtbauvariante und einer schmelzmetallurgischen wälzgefrästen Referenz in Abhängigkeit von der Stückzahl

Bei Betrachtung der Einzelfertigung (Stückzahl 1) wird ersichtlich, dass die Leichtbauvariante 2 (35 % Massereduktion) mit 342,94 € am günstigsten ist. Variante 1 (30 % Massereduktion) hat Fertigungskosten von 379,78 €, Variante 3 (44 % Massereduktion) von 411,92 € und Variante 4 (57 % Massereduktion) von 424,10 €. Die Einzelfertigung der schmelzmetallurgischen Referenz ergibt Stückkosten von 1.486,83 € durch die voll zugeschriebenen Werkzeugkosten von 1000 €. Ändern sich Fertigungsparametersätze (z. B. auf Grund von Komplexitätsanforderungen) und die Prozesskette, muss eine detaillierte Bewertung vorgenommen werden, wobei die geringste Bauteilmasse nicht automatisch zu den geringsten Fertigungskosten führt. Zur Fertigung der filigranen Stege zur Erreichung höher Masseinsparungen sind Fertigungsparametersätze mit niedrigeren Schichtstärken und geringeren Aufbauraten notwendig. Leichtbauvariante 2 bietet einen guten Trade-Off zwischen erzielter Massereduktion und Fertigungskosten. Ab einer Stückzahl von 14 ist der Break-Even-Point der schmelzmetallurgischen Variante erreicht und die Fixkosten (Programmierung und Werkzeugkosten) werden über die Stückzahl amortisiert. Dies resultiert in geringeren Fertigungskosten pro Stück als im Laser-Strahlschmelzen. Bei der Fertigung von Variante 4 entstehen trotz der verdoppelten Schichtzeit der Multimaterialfertigung (siehe ANSTAETT 2020) Stückkosten, die mit Variante 1 vergleichbar sind. Die erhöhte Schichtzeit wird durch die verstärkte Nutzung von Leichtbau (30 zu 57 % Massereduktion)

## Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

und den reduzierten Aufwand in der Nachbearbeitung (Supportentfernung und Härten) kompensiert. Hier greift die Leichtbauökonomie nach KAMPS (KAMPS 2018). Bei einer Fertigung von fünf Rädern liegen die Kosten knapp unter denen der Leichtbauvariante 1. Damit stellt diese Variante eine konkurrenzfähige Alternative mit erhöhtem Leichtbau ohne Mehrkosten dar, wie es im industriellen Umfeld oft gefordert wird. Variante 3 hat dagegen über alle Stückzahlen die höchsten Fertigungskosten.

Die Wahl der passenden Bauweise und der resultierenden Prozesskette ist damit entscheidend für den wirtschaftlichen Einsatz des Laser-Strahlschmelzens für Verzahnungen. Ohne die Betrachtung der erzielten Mehrwerte durch Leichtbauweisen in der spezifischen Anwendung ist das Laser-Strahlschmelzen für kleine Stückzahlen bis zu einer Losgröße von 14 wirtschaftlich. Eine Massereduktion von mehr als 35 % ist nur noch durch komplexere Strukturen möglich, die eine geringere Schichtstärke und geringere Produktivität bedingen. Dadurch verschiebt sich der Break-Even-Punkt hin zur Stückzahl 8. Im Vergleich zu Kostenberechnung von KAMPS zeigen sich signifikante Kostenreduktionen, die maßgeblich verringerten Pulverkosten und gesteigerter Produktivität zuzuschreiben sind. Der Break-Even-Point verschiebt sich von der Stückzahl 6 auf höhere Stückzahlen bis 14.

Werden die Fertigungskosten der Leichtbauvarianten gegenübergestellt (vgl. Abbildung 91), so zeigt sich, dass unter den gegebenen Rahmenbedingung ein Kostenminimum in der Fertigung von Leichtbauvariante 2 erreicht wird.

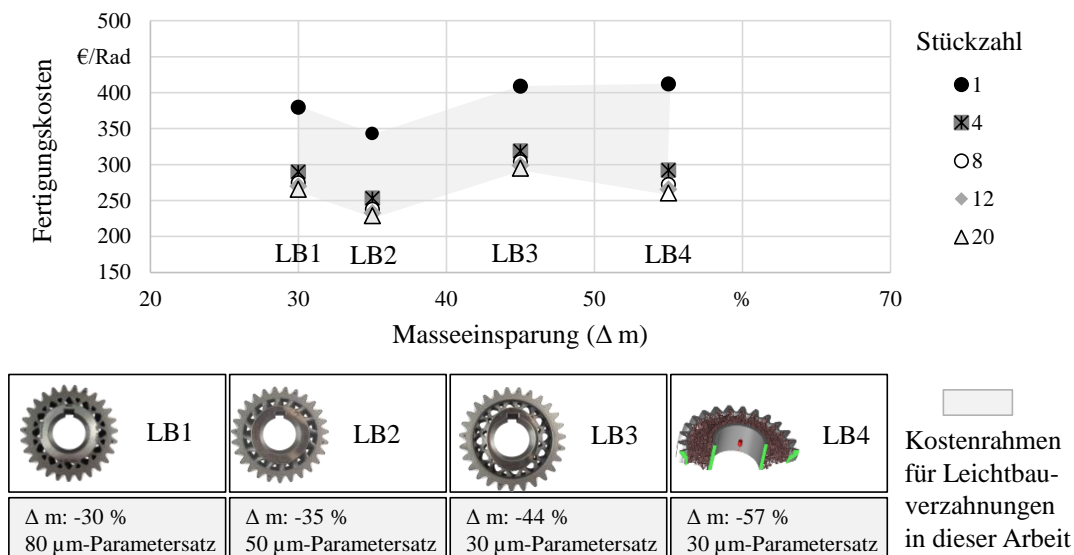


Abbildung 91 Betrachtung der Fertigungskosten in Abhängigkeit der verwendeten Fertigungsparametersätze und Prozesskette

Dies resultiert aus einer Kombination aus Material, welches nicht aufgebaut werden muss ( $\Delta m$ ) und einer hohen Aufbaurrate im Laser-Strahlschmelzen. Andere Leichtbauvarianten müssen einerseits mehr Material aufbauen (Variante 1) oder benötigen durch filigrane Leichtbaustrukturen Fertigungsparametersätze mit niedriger Aufbaurrate (Variante 3 und 4). Die Kombination aus Design und Fertigungsparametersatz ist ausschlagend für niedrige Fertigungskosten.

Werden die Fertigungskosten durch das Bauteilgewicht dividiert ergibt sich ein Kostenfaktor in €/kg (SCHNECK 2021). In dieser Betrachtung zeigt sich, dass Leichtbauvariante 2 den geringsten Kostenfaktor mit 316 €/kg besitzt während Leichtbauvariante 4 den höchsten Kostenfaktor von 622 €/kg besitzt (siehe Tabelle 19). Der berechnete Kostenfaktor vernachlässigt aber das Leichtbaupotenzial im Vergleich zu einem nicht optimierten Bauteil, welches mit diesem Fertigungsparametersatz und der Prozesskette realisiert werden kann. Um dies zu berücksichtigen wird der Kostenfaktor über den verbleibenden Anteil der Bauteilmasse ( $1 - \Delta m$ ) normiert um den **Kostenfaktor<sub>LB</sub>** zu erhalten.

*Tabelle 19 Kostenfaktoren der Leichtbauvarianten resultierend aus Fertigungsparametersatz und Prozesskette für eine Stückzahl von 12*

	<b>Leichtbauvariante 1</b>	<b>Leichtbauvariante 2</b>	<b>Leichtbauvariante 3</b>	<b>Leichtbauvariante 4</b>
Kostenfaktor, €/kg	388	361	538	622
Kostenfaktor <sub>LB</sub> , €/kg	272	234	295	267

Leichtbauvariante 4 (höchste Masseinsparung & höchster Kostenfaktor) besitzt nach der Normierung den zweitniedrigsten Kostenfaktor<sub>LB</sub> nach Leichtbauvariante 2. Dies korrespondiert mit den berechneten Fertigungskosten aus Abbildung 91.

In der Bewertung der Kostenstruktur des Laser-Strahlschmelzens sind die hohen Anlagenkosten von 1.722.000 € unter anderem für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) als kritisch anzusehen. Die industrielle Anlage mit vier Lasern verspricht zwar eine hohe Aufbaurrate, allerdings sind die Investitionskosten für KMU sehr hoch. Um einen Return-on-Invest (RoI) zu erzielen ist eine hohe Auslastung der Laser-Strahlschmelzanlage erforderlich. Um dies zu gewährleisten, muss eine passende Applikation mit ausreichender Stückzahl zur Auslastung der Anlage vorhanden sein. Die Identifikation und Bewertung von AM-Applikationen sind damit



von entscheidender Bedeutung für die wirtschaftliche Nutzung des Laser-Strahlschmelzens. Die Fertigungskosten des Laser-Strahlschmelzens resultieren zu ca. 78 % aus dem Maschinenstundensatz. Die Energiekosten und Raummiete tragen ca. 3 % und 0,8 % im betrachteten Szenario zum Maschinenstundensatz bei. Eine Verdopplung der Raummiete (ca. 80 €/m<sup>2</sup>) und eine Verdreifachung der Energiekosten (0,5 €/kWh) steigern die Gesamtkosten im Laser-Strahlschmelzen um 5,1 %. Es wird deutlich, wie stark die Kosten im Laser-Strahlschmelzen von den Kosten der genutzten Anlage abhängen.

In einem weiteren Schritt können die gesammelten Daten der Kostenberechnung wie Prozesszeit und Energieverbrauch der Laser-Strahlschmelzanlage zur Bestimmung des Gesamtenergieverbrauchs und zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Equivalents genutzt werden. Untersuchungen von LUTTER-GÜNTHER ET AL. zeigen beispielhaft, dass die Herstellung des Metallpulvers mit einem hohen Ressourcenverbrauch (Energie, Gas und damit CO<sub>2</sub>-Equivalent) im Vergleich zu schmelzmetallurgischem Werkstoffen verbunden ist. Daher sind additiv gefertigte Bauteile nicht zwangsläufig ressourcenschonend in der Herstellung. Vielmehr kann oft eine Einsparung von Ressourcen in der Nutzungsphase der Bauteile z. B. durch Leichtbau-effekte erzielt werden. Dies ist bei einem ganzheitlichen Lifecycle-Assessment (LCA) für additiv gefertigte Bauteile zu beachten.

## 9.4 Fazit

Insgesamt zeigt sich, dass die Fertigung von Verzahnungen für Stückzahlen kleiner als 15 eine wirtschaftliche Alternative zum Wälzfräsen darstellen kann. Die Wahl der Bauweise hängt stark von der damit verbundenen Prozesskette und den dafür erforderlichen Fertigungsparametersätzen zusammen. Für komplexe Leichtbaustrukturen mit einer hohen Massereduktion sind teilweise Fertigungsparametersätze mit geringer Aufbaurate (siehe Variante 3) oder Sonderverfahren wie die Multimaterial-Fertigung (siehe Variante 4) notwendig, durch die die Herstellungskosten erhöht werden. Es zeigt sich, dass ein Kompromiss aus produktiven Parametersätzen und geringer Leichtbaukomplexität zu den geringsten Fertigungskosten (Variante 2) führt. Vernachlässigt wurden in der bisherigen Betrachtung mögliche Mehrkosten, die in einer längeren Design- und Optimierungsphase in der Konstruktion von Variante 1 zu Variante 4 entstehen. Die sichere Auslegung von komplexen Strukturen erfordert einerseits erfahrene Ingenieure und Entwicklerinnen, andererseits werden fortschrittliche Softwarelösungen eingesetzt, die mit hohen Lizenzkosten verbunden sind. Diese Kostenfaktoren sind stark unternehmensspezifisch.

Dem vorgestellten Ansatz des *Design-to-Cost* steht ein Ansatz gegenüber, der die Mehrwerte bereits früh in der Entwicklungsphase in den Vordergrund stellt. Dieses holistische Vorgehen in einem vernetzten Team ist als *Design-to-Value* bekannt (MYERHOLTZ ET AL. 2016). Bei dieser Betrachtungsweise werden unter anderem die Vorteile bei der Herstellung, z. B. schnellere Verfügbarkeit, und in der Nutzungsphase wie CO<sub>2</sub>-Einsparung durch eine Massereduktion quantifiziert und den Mehrkosten in der Herstellung gegenübergestellt.

## 10 Schlussbetrachtung

### 10.1 Zusammenfassung

Bestehende, mittels Laser-Strahlschmelzen gefertigte Verzahnungen nach dem heutigen Stand der Technik werden geringere Tragfähigkeitskennwerte als schmelzmetallurgische Referenzvarianten zugeschrieben. Für leichtbauoptimierte Verzahnungen fehlten bisher jegliche Kennwerte und die Vorteile des Laser-Strahlschmelzens konnten durch die Unsicherheit bei der Herstellung und der erzielbaren Qualität nicht in der Antriebstechnik eingesetzt werden. Zur Erreichung verbesserter Kennwerte wurde in dieser Arbeit die Prozesskette des Laser-Strahlschmelzens über die Weiterentwicklung von Fertigungsparametersätzen und die Auswahl von Prozessgrößen optimiert. Es wurde eine Auslegungsmethode für den Designraum von Leichtbaustrukturen entwickelt, welcher zu dauerfesten Leichtbauverzahnungen führt. Die erzielten Materialkennwerte wurden für Anwender gezielt mit der ISO6336-5 verglichen und Handlungsempfehlungen zu Design und der Fertigung stehen bereit. Zusätzlich wurde das Potenzial der Multimaterialfertigung für Leichtbauverzahnungen erstmalig aufgezeigt. Die zentralen Ergebnisse der Arbeit sind in Abbildung 92 dargestellt.

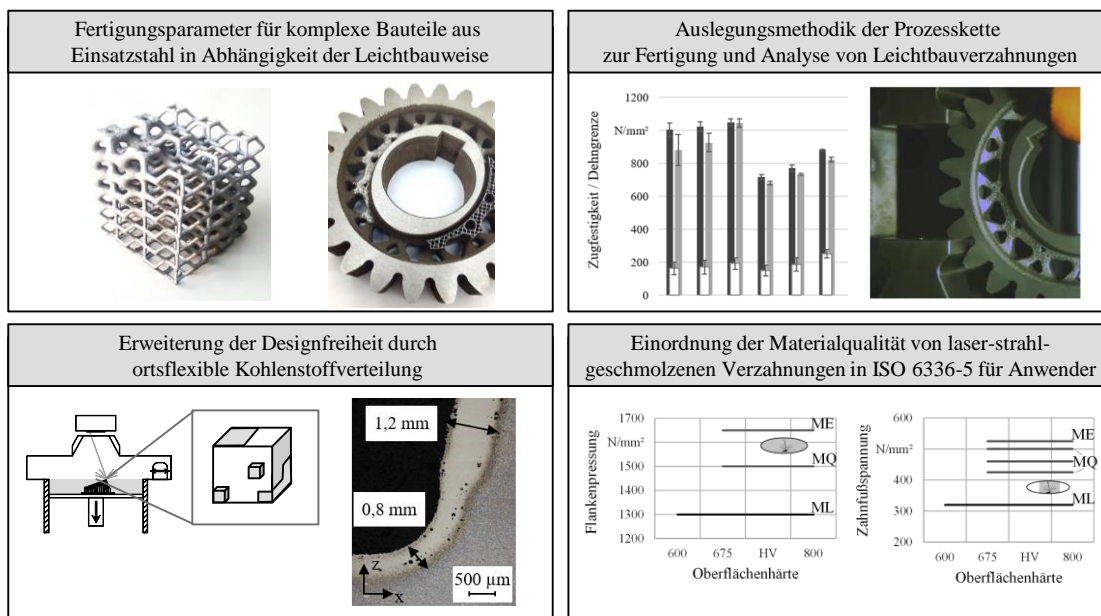


Abbildung 92: Zentrale Ergebnisse der Arbeit

Zuerst wurde eine Vorgehensweise zur ganzheitlichen Optimierung von Fertigungsparametersätzen für das Laser-Strahlschmelzen in Abhängigkeit von der

Bauweise für Anwenderinnen entwickelt. Bei dieser Vorgehensweise werden, basierend auf Einzelspurversuchen, ein Parametersatz für das Vollmaterial, die Supportstrukturen und für Leichtbaustrukturen wie Gitter erarbeitet. Dies ermöglicht die Herstellung leichtbauoptimierter Verzahnungen aus 16MnCr5 mit einer relativen Dichte von mehr als 99,67 % über den gesamten Bauteilquerschnitt.

Im nächsten Schritt wurden die weiteren Prozessgrößen wie Art des Schutzgases und Bauplattentemperatur ausgewählt. Hierbei wurden die Wechselwirkungen mit den weiteren Prozesskettenschritten wie dem Einsatzhärten analysiert. Es zeigte sich, dass Stickstoff als Schutzgas die Einsatzhärteergebnisse negativ beeinflusst, indem die Oberflächenhärte (-20 %) und die Einsatzhärte tiefe (-50 %) herabgesetzt werden. Die Einflussgrößen können über eine Matrix anwendungsspezifisch nach den Anforderungen des Anwenders ausgewählt werden, um eine optimale Ausgestaltung der Fertigung zwischen Qualität, Zeit und Kosten zu gewährleisten.

Nachfolgend wurde die Materialqualität an Proben und an Leichtbauverzahnungen bestimmt. Dabei zeigte sich eine hohe Reproduzierbarkeit der mechanischen Kennwerte und der Maßhaltigkeit sowohl innerhalb eines Bauauftrags (lokal auf der Bauplatte) als auch zwischen bis zu 12 Bauaufträgen. Die Maßhaltigkeit des Laser-Strahlschmelzens von 16MnCr5 liegt unabhängig von der Bauteilgröße im Bereich von IT12. Die Tragfähigkeit der Leichtbauverzahnungen wird durch die Leichtbaustruktur weder in der statischen Gestaltfestigkeit, der Zahnfußtragfähigkeit, noch der Zahnflankentragfähigkeit reduziert. Der erarbeitete Designraum zur Optimierung ermöglicht die dauerhafteste Auslegung von Leichtbauverzahnungen mit einer Massereduktion von 44 %. Eine signifikante Steigerung der Leistungsdichte ist damit durch den Einsatz von AM-Leichtbauverzahnungen möglich. Alle Proben und Leichtbauverzahnungen wurden auf einer EOS M290 Laser-Strahlschmelzanlage (Installationsjahr 2017) mit einem Fokusdurchmesser von 73  $\mu\text{m}$  unter Laborbedingungen gefertigt. Dies stellt eine Systemgrenze dar, die bei der Übertragung der Methodik und Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Die Materialqualität der Verzahnungen aus 16MnCr5 wurde über die gesamte Arbeit in die Materialklassen nach DIN ISO 6336-5 eingeordnet. Die Anforderungen der Materialgüten MQ und ME wurden bis auf den zulässigen Sauerstoff- und Wasserstoffgehalt und der Reinheit vor und nach dem Einsatzhärten erfüllt. Spezifische Anforderungen wie ein Umformgrad können dagegen durch das Laser-Strahlschmelzen mit der zuvor ausgewählten Prozesskette nicht erfüllt werden. Die resultierende ertragbare Flankenpressung liegt im Bereich zwischen MQ und ME, während die ertragbare Zahnfußnennspannung nur eine Qualität im Bereich

zwischen ML und MQ erreicht. Die erzielbare Materialqualität wird in diesem Fall durch die geringere Oberflächenqualität herabgesetzt. Auf Basis der Ergebnisse wurden spezifische Handlungsempfehlungen aufgestellt, die den Anwendenden eine Hilfestellung in der Gestaltung von Bauteilen und der Prozesskette für die Herstellung von Leichtbauverzahnungen aus 16MnCr5 liefert.

Im weiteren Verlauf der Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Verknüpfung der Multimaterialverarbeitung und des In-situ-Legierens im Laser-Strahlschmelzen das Potenzial besitzt, den Kohlenstoffgehalt bereichsflexibel in Bauteilen einzustellen und somit die Designfreiheit im Vergleich zum Einsatzhärten zu erweitern. Dieser Ansatz wird dadurch ermöglicht, dass Material mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,8 Ma.-% ohne Rissbildung im Prozess aufgebaut werden kann. Der Multimaterialprozess ist robust und zeigt keine Risse oder Fehlstellen im Übergangsbereich in vertikaler oder horizontaler Ausrichtung. In der Summe kann der Härtetiefenverlauf lokal angepasst werden, wodurch der Designraum in Richtung lokal anpassbarer Materialien erweitert und gleichzeitig die Einstellung optimaler Tragfähigkeiten in Zahnfuß und Zahnflanke von Verzahnungen erlaubt wird.

Durch die Nutzung des *Design-to-Cost*-Ansatzes konnte gezeigt werden, dass eine differenzierte Betrachtung der Prozesskette in Verknüpfung mit der Leichtbauweise notwendig ist. Im gewählten Produktionsszenario einer 4-Laseranlage weist das Laser-Strahlschmelzen bis zur Stückzahl 14 geringere Fertigungskosten als das Wälzfräsen auf.

## 10.2 Diskussion

Im Folgenden werden die Vorgehensweise der Arbeit und die Ergebnisse einer wissenschaftlichen Reflexion unterzogen. An Hand der Forschungsfragen wurden die Erkenntnisse systematisch erarbeitet. Dabei wurde das Vorgehen in jeder Forschungsfrage mittels der **Design Reseach Methodoloy** nach BLESSING & CHAKRABARTI erarbeitet (BLESSING & CHAKRABARTI 2009). Die Basis der Vorgehensweise bildet eine literaturbasierte Detaillierung des Forschungsansatzes und die Entwicklung der methodischen Schritte. Eine beispielhafte experimentelle Umsetzung des Vorgehens wurde mit dem Werkstoff 16MnCr5 und einer Leichtbauverzahnung durchgeführt. Auf den Erkenntnissen dieser Schritte wurden jeweils Handlungsempfehlungen entwickelt und Anwendern zur Verfügung gestellt. Die Handlungsempfehlungen werden experimentell validiert (Kapitel 5 und 8) oder die Allgemeingültigkeit und Plausibilisierung kritisch diskutiert (Kapitel 6 und

7). Die Erkenntnisse der *Design-to-Cost*-Betrachtung (Kapitel 9) sind auf die ausgewählten Prozessketten und die zugrundeliegenden Produktionsszenarien beschränkt.

Die vorliegende Arbeit wird durch die **heuristische Systemgrenze** des Beispielwerkstoffs 16MnCr5, der verwendeten Geometrie der Leichtbauverzahnung (Typ-1), der Fertigungsanlage und der Prozesskette bestimmt. Es wurden systematische Vorgehensweisen auf dieser Basis entwickelt, die allgemeingültige Handlungsempfehlungen, eine Multimaterialfertigung und normgerechte Kennwerte als Ergebnis liefern. Die entwickelten Handlungsempfehlungen folgen einer präskriptiven Einteilung. Insgesamt wird ein theoretisches Verständnis für die Wirkzusammenhänge im Laser-Strahlschmelzen und der Prozesskette erarbeitet und in gültige Handlungsempfehlungen zur Anwendung innerhalb der Systemgrenzen überführt. Begleitet von kritischen Reflektionen und Plausibilisierungen werden dabei die übergeordneten Ziele „*provide understanding and support*“ nach BLESSING & CHAKRABARTI für Anwenderinnen erreicht (BLESSING & CHAKRABARTI 2009).

Der Stand der Technik wird durch eine holistische Vorgehensweise zur Entwicklung von Parametersätzen ausgehend von Einzelspuren mit dem Fokus für Leichtbau- und Supportstrukturen erweitert, die die prozesssichere Fertigung komplexer Bauteile im Laser-Strahlschmelzen ermöglicht. Die Entwicklung von Parametersätzen für Supportstrukturen wurde von einem qualitativen Ansatz in eine quantifizierende Methode überführt, die die Entfernbarkeit über die ertragbare Schubspannung und die Festigkeit der Struktur über die Zugfestigkeit als Bewertungskriterium nutzt. Zusätzlich wurden Wechselwirkungen zwischen den Prozessketten-schritten identifiziert, die unerlässlich für die Beherrschung der AM-Prozesskette sind und eine qualitätsgesicherte Bauteilfertigung erst möglich machen. Die Tragfähigkeitskennwerte erweitern den Stand der Technik durch die Einbeziehung von Leichtbaustrukturen und der erstmaligen Prüfung der Zahnflankentragfähigkeit signifikant. In Zusammenhang mit der Einordnung der Kennwerte in die ISO 6336-5 wird die Lücke für Anwender geschlossen und der industrielle Einsatz von AM im Bereich der Antriebstechnik ermöglicht. Die ortsflexible Einstellung des Kohlenstoffgehalts hebt die bisherigen Einschränkungen des Einsatzhärtens für komplexe Bauteile und Leichtbauauslegungen auf und erweitert die Designfreiheiten in der Leichtbauauslegung für Verzahnungen deutlich.

Die **Wissenschaftsgebiete** der Verzahnungstechnik, des Einsatzhärtens, der Werkstofftechnik, des Prozessverständnisses beim Laser-Strahlschmelzen, der Konstruktion leichtbauoptimierter Bauteile und des Distortion-Engineering werden in der Arbeit betrachtet.

### 10.3 Ausblick

Basierend auf den Erkenntnissen können weiterführende Forschungsthemen identifiziert werden.

In **Kapitel 5** wurde das Vorgehen zur Entwicklung eines bauweisen- und anwendungsspezifischen Parametersatzes entwickelt und am Werkstoff 16MnCr5 sowie mehreren Leichtbaustrukturen validiert. Das Verhalten anderer Werkstoffe, besonders schwerschweißbarer Nickelbasis-Legierungen oder hochreflektierender Kupferlegierungen mit ungenügenden Einschweißiefen und kleinem Parameterfenster zur Fertigung komplexer Geometrien ist in der Literatur noch unzureichend untersucht. Das Vorgehen kann auf diese und weitere Werkstoffe übertragen werden. Eine Erweiterung des Parameterraums ist durch die Variation der Einflussfaktoren wie einer stark erhöhten Bauplattentemperatur oder einer verbesserten Anlagentechnik (höhere Laserleistungen, Pulsen des Lasers) möglich. Schlussendlich besitzt die Kopplung der Parametersatzentwicklung mit Simulationsmethoden großes Potenzial. Die Simulation der Wärmeleitung und deren Homogenisierung durch Anpassung der Laserleistung und Geschwindigkeit könnten den Versuchsaufwand stark reduzieren. Mit aktuellen Datenformaten ist eine Zerlegung des Bauteils in diskrete Geometrieelemente und Zuweisung von Parametersätzen notwendig. Eine stetige Anpassung der Fertigungsparametersätze innerhalb einer Geometrie könnte die Prozessdynamik weiter positiv beeinflussen.

Die Bewertung der Einflussgrößen in **Kapitel 6** wurde unter konstanten Parametern des Einsatzhärtens durchgeführt. Eine Optimierung der Parameter auf das spezifische Ausgangsgefüge ist bisher noch nicht erfolgt. Insbesondere die Erhaltung des feinen Gefüges aus dem Ausgangszustand könnte die dynamischen Eigenschaften positiv beeinflussen. Des Weiteren sind die genauen Wirkmechanismen, die zur Verringerung der Einsatzhärtetiefe führen, noch unbekannt. Vertiefte Untersuchungen zum Erwärmverhalten, der Kohlenstoffaufnahme an rauen Oberflächen und Kohlenstoffdiffusion sollten unternommen werden. Zusätzlich sollten weitere Verfahren zur Oberflächenhärtung, wie etwa das Nitrieren, untersucht werden. Durch die niedrigeren Temperaturen beim Nitrieren und den Verzicht auf ein Abschrecken könnte der Verzug deutlich reduziert und die Umsetzung von Leichtbaustrukturen vereinfacht werden.

In **Kapitel 7** wurden Erkenntnisse zur Reproduzierbarkeit vorgestellt. Eine Übertragung auf eine Anlagentechnik mit einem größeren Bauraum oder mehreren Lasern kann die Ergebnisse unter anderem auf Grund der veränderten Spratzermenge und Inhomogenität in der Schutzgasströmung bei großen Bauräumen verändern.

Darüber hinaus wurde die Tragfähigkeit der Verzahnungen mit einer Typ-1-Geometrie ermittelt. Eine Ergänzung der Datenbasis mit erweiterten Geometrien erscheint sinnvoll. Ebenso sollten angepasste Verfahren zur Beeinflussung der Oberfläche (z. B. Kugelstrahlen oder Ausschleifen des Zahnfußes) untersucht werden. Schlussendlich ist die Untersuchung weiterer Schadensursachen von Verzahnungen wie Fressen zwar nicht im Betrachtungshorizont dieser Arbeit, aber für eine industrielle Umsetzung relevant.

Mit Blick auf **Kapitel 8** ist zu prüfen, inwieweit der Ansatz des In-situ-Legierens auf weitere Werkstoffkombinationen mit 16MnCr5 übertragbar ist. Geeignete Werkstoffe zur Steigerung der Randhärte wären z. B. Hartstoffe wie Wolframkarbide, Nitride oder auch Boride. Eine dauerfeste Einbindung in eine Matrix aus 16MnCr5 erscheint über einzelne Partikel allerdings schwierig. Weitere Werkstoffe mit positiven Eigenschaften sind Vanadium, Niob oder Titan, die durch die Keimbildung in der Schmelze eine Kornfeinung herbeiführen. Dadurch könnte ein eigenschaftsangepasster Werkstoff entstehen.

Grundsätzlich wird das Laser-Strahlschmelzen weiterentwickelt und die entstehende **Multimaterialfertigung** sollte Gegenstand weiterer Forschung sein. Die Verknüpfung mehrerer Materialien in einer Verzahnung besitzt hohe Anwendungsrelevanz im Bereich der Funktionsoptimierung (z. B. Dämpfung und Kühlung). Darüber hinaus könnte der Ansatz des *Predictive Maintenance* durch die automatisierte Integration von Sensoren in Verzahnungen umgesetzt werden (BINDER ET AL. 2022). Die wirkstellennahe Erfassung von Echtzeitdaten und deren Auswertung könnten in vielen Anwendungen die Sicherheit verbessern.



# 11 Literaturverzeichnis

ABDELWAHED ET AL. 2020

Abdelwahed, M.; Casati, R.; Bengtsson, S.; Larsson, A.; Riccio, M.; Vedani, M.: Effects of Powder Atomisation on Microstructural and Mechanical Behaviour of L-PBF Processed Steels. *Metals* 10 (2020) 11, S. 1474.

ABELE ET AL. 2015

Abele, E.; Stoffregen, H. A.; Klimkeit, K.; Hoche, H.; Oechsner, M.: Optimisation of process parameters for lattice structures. *Rapid Prototyping Journal* 21 (2015) 1, S. 117-127.

ABOULKHAIR ET AL. 2014

Aboulkhair, N. T.; Everitt, N. M.; Ashcroft, I.; Tuck, C.: Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* 1-4 (2014), S. 77-86.

ABOULKHAIR ET AL. 2016

Aboulkhair, N. T.; Maskery, I.; Tuck, C.; Ashcroft, I.; Everitt, N. M.: On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology* 230 (2016), S. 88-98.

ADAM & ZIMMER 2014

Adam, G. A.O.; Zimmer, D.: Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7 (2014) 1, S. 20-28.

ADAM & ZIMMER 2015

Adam, G. A.; Zimmer, D.: On design for additive manufacturing: evaluating geometrical limitations. *Rapid Prototyping Journal* 21 (2015) 6, S. 662-670.

ALKAHARI ET AL. 2012

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

ANSTAETT 2020

Anstaett, C.: Multimaterialverarbeitung mittels Laserstrahlschmelzen am Beispiel von metallischen Verbindungen mit der Kupferlegierung CW106C. Dissertation Technische Universität München (2020).

AUMAYR ET AL. 2020

Aumayr, C.; Platl, J.; Zunko, H.; Turk, C.: Additive Manufacturing of a Low-alloyed Engineering Steel. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 165 (2020) 3, S. 137-142.

BABUSKA ET AL. 2020

Babuska, T. F.; Johnson, K. L.; Verdonik, T.; Subia, S. R.; Krick, B. A.; Susan, D. F.; Kustas, A. B.: An additive manufacturing design approach to achieving high strength and ductility in traditionally brittle alloys via laser powder bed fusion. Additive Manufacturing 34 (2020), S. 101-187.

BADROSSAMAY ET AL. 12-14 May 2009

Badrossamay, M.; Evren Y.; Vaerenbergh, J. V.; Kruth, J. P.: Improving Productivity Rate in SLM of Commercial Steel Powders. RAPID 2009. Schaumburg 12-14 May 2009.

BAJAJ ET AL. 2020

Bajaj, P.; Hariharan, A.; Kini, A.; Kürnstener, P.; Raabe, D.; Jäggle, E. A.: Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. Materials Science and Engineering: A 772 (2020).

BAL'SHIN 1949

Bal'shin, M. Y.: Relation of mechanical properties of powder metals and their porosity and the ultimate properties of porous metal-ceramic materials. Doklady Akademii Nauk (1949).

BARBA ET AL. 2020

Barba, D.; Alabort, C.; Tang, Y. T.; Viscasillas, M. J.; Reed, R. C.; Alabort, E.: On the size and orientation effect in additive manufactured Ti-6Al-4V. Materials & Design (2020).

BARGEL & SCHULZE 2018

Bargel, H. J.; Schulze, G. (Hrsg.): Werkstoffkunde. 12., bearbeitete Auflage, korrigierter Nachdruck. Berlin: Springer Vieweg 2018. ISBN: 9783662486283.

BARTELS ET AL. 2020

Bartels, D.; Klaffki, J.; Pitz, I.; Merklein, C.; Kostrewa, F.; Schmidt, M.: Investigation on the Case-Hardening Behavior of Additively Manufactured 16MnCr5. Metals 10 (2020), S. 536.

BARTSCH ET AL. 2020

Bartsch, K.; Ohrenberg, J.; Emmelmann, C.: Benchmark parts for the evaluation of optimized support structures in Laser Powder Bed Fusion of metals. Procedia CIRP 94 (2020), S. 254-259.

BAUMERS ET AL. 2016

Baumers, M.; Dickens, P.; Tuck, C.; Hague, R.: The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change* 102 (2016), S. 193-201.

BEER ET AL. 2018

Beer, O.; Merklein, C.; Gerhard, D.; Hentschel, O.; Rasch, M.; Schmitt, M.: Processing of the Heat Resistant Bearing Steel M50NiL by Selective Laser Melting. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* (2018).

BENDSØE & SIGMUND 2004

Bendsøe, M. P.; Sigmund, O.: *Topology Optimization. Theory, Methods, and Applications. Second Edition, Corrected Printing.* Berlin, Heidelberg: Springer 2004.

BERGMANN ET AL. 1999

Bergmann, C.; Rettig, H.; Hück, M.; Matt, P.; Niemann, G.; Winter, H.; Stahl, K.; Tobie, T.: Ergänzungen zu FVA-Merkblatt Nr. 0/5 - Empfehlung zur Vereinheitlichung von Pulsatorversuchen zur Zahnfußtragfähigkeit von vergüteten und gehärteten Zylinderrädern. Frankfurt 1999.

BERNER 2021

Berner, O.: Untersuchung von Einflussparametern auf die statische und dynamische Festigkeit in der Additiven Fertigung - Laserstrahlschmelzen. Masterarbeit Technische Hochschule Ingolstadt (2021).

BIHLMEIR 2018

Bihlmeir, A.: Topologieoptimierter Formleichtbau durch den Einsatz additiver Fertigung bei der Zahnradherstellung. Bachelorarbeit Hochschule Augsburg (2018).

BINDER ET AL. 2018

Binder, M.; Anstaett, C.; Horn, M.; Herzer, F.; Schlick, G.; Seidel, C.; Schilp, J.; Reinhart, G.: Potentials and challenges of multi-material processing by laser-based powder bed fusion. *Conference Proceeding - 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference* (2018).

BINDER ET AL. 2022

Binder, M.; Stapff, V.; Heinig, A.; Schmitt, M.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Additive manufacturing of a passive, sensor-monitored 16MnCr5steel gear incorporating a wireless signal transmission system. *Procedia CIRP* (2022).

BIRKHOLZ 2021

Birkholz, J.: Untersuchung von Einflussparametern auf Werkstoffeigenschaften und Reproduzierbarkeit in der Prozesskette des Laser-Strahlschmelzens. Bachelorarbeit Hochschule Augsburg (2021).

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L.; Chakrabarti, A.: DRM, a DesignResearchMethodology (2009).

BMT ADDITIVE 2019

BMT Additive: BMT Additive | Beyond conventional metal production.  
<<https://www.discoverbenelux.com/bmt-additive/>> - 03/08/2021 13:05:20.

BMW GROUP 2015

BMW Group: Renntechnik aus dem 3D-Drucker: BMW fertigt Wasserpumpenrad für DTM-Rennwagen in additivem Fertigungsverfahren.  
<[https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0215062DE/renntechnik-aus->](https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0215062DE/renntechnik-aus-) - 03/05/2021 16:17:15.

BOBBIO ET AL. 2017

Bobbio, L. D.; Qin, S.; Dunbar, A.; Michaleris, P.; Beese, A. M.: Characterization of the strength of support structures used in powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V. Additive Manufacturing 14 (2017), S. 60-68.

BOES ET AL. 2018

Boes, J.; Röttger, A.; Mutke, C.; Escher, C.; Theisen, W.: Microstructure and mechanical properties of X65MoCrWV3-2 cold-work tool steel produced by selective laser melting. Additive Manufacturing 23 (2018), S. 170-180.

BÖSELE 2020

Bösele, M.: Untersuchung von Einflussparametern auf Werkstoffeigenschaften in der Prozesskette des Laser-Strahlschmelzens. Bachelorarbeit Hochschule Augsburg (2020).

BOUQUET ET AL. 2014

Bouquet, J.; Hensgen, L.; Klink, A.; Jacobs, T.; Klocke, F.; Lauwers, B.: Fast Production of Gear Prototypes – A Comparison of Technologies. Procedia CIRP 14 (2014), S. 77-82.

BOURELL ET AL. 2017

Bourell, D.; Kruth, J. P.; Leu, M.; Levy, G.; Rosen, D.; Beese, A. M.; Clare, A.: Materials for additive manufacturing. CIRP Annals 66 (2017) 2, S. 659-681.

BRACKE 2016

Bracke, S.: Prozessfähigkeit bei der Herstellung komplexer technischer Produkte.

Statistische Mess- und Prüfdatenanalyse. 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016. ISBN: 978-3-662-48214-8.

BRANNER 2010

Branner, G.: Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren. Dissertation Technische Universität München (2010).

BREITKOPF (2021)

Breitkopf, A.: Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020. (2021).

BRINKSMEIER ET AL. 2011

Brinksmeier, E.; Lübben, T.; Fritsching, U.; Cui, C.; Rentsch, R.; Sölter, J.: Distortion minimization of disks for gear manufacture. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011) 4, S. 331-338.

BRUMMER 2021

Brummer, M.: Experimentelle Untersuchung zur Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeit von additiv gefertigten Zahnrädern mittels Laser-Strahlschmelzen (LPBF) von 16MnCr5. Masterarbeit Technische Universität München (2021).

BRUZEK & LEIDICH 2007

Bruzek, B.; Leidich, E.: Dünnwandige verzahnte Naben mit Passfedernut. Welle-Nabe-Verbindungen. *Gestaltung Fertigung Anwendungen*. VDI Wissensforum IWB GmbH (2007), S. 219–239.

BUCHBINDER ET AL. 2011

Buchbinder, D.; Schilling, G.; Meiners, W.; Pirch, N.; Wissenbach, K.: Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM. *RTejournal - Forum für Rapid Technologie* 8 (2011).

BULDUK ET AL. 2022

Bulduk, M. E.; Çalıřkan, C. İ.; Cořkun, M.; Özer, G.; Koç, E.: Comparison of the effect of different topological designs and process parameters on mechanical strength in gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119 (2022) 9-10, S. 6707-6716.

BURKART ET AL. 2011

Burkart, K.; Bomas, H.; Zoch, H.-W.: Fatigue of notched case-hardened specimens of steel SAE 5120 in the VHCF regime and application of the weakest-link concept. *International Journal of Fatigue* 33 (2011) 1, S. 59-68.

CARTER 2014

Carter, L.: Selective laser melting of nickel superalloys for high temperature applications. Dissertation University of Birmingham (2014).

CATCHPOLE-SMITH ET AL. 2017

Catchpole-Smith, S.; Aboulkhair, N.; Parry, L.; Tuck, C.; Ashcroft, I. A.; Clare, A.: Fractal scan strategies for selective laser melting of ‘unweldable’ nickel superalloys. *Additive Manufacturing* 15 (2017), S. 113-122.

CHARLES ET AL. 2022

Charles, A.; Hofer, A.; Elkaseer, A.; Scholz, S. G.: Additive Manufacturing in the Automotive Industry and the Potential for Driving the Green and Electric Transition. In: Scholz, S. G. et al. (Hrsg.): *Sustainable Design and Manufacturing*. Singapore: Springer Singapore 2022, S. 339-346. ISBN: 978-981-16-6127-3. (Smart Innovation, Systems and Technologies).

CHEN ET AL. 2017

Chen, H.; Gu, D.; Dai, D.; Ma, C.; Xia, M.: Microstructure and composition homogeneity, tensile property, and underlying thermal physical mechanism of selective laser melting tool steel parts. *Materials Science and Engineering: A* 682 (2017), S. 279-289.

CHOUGRANI ET AL. 2017

Chougrani, L.; Pernot, J.-P.; Véron, P.; Abed, S.: Lattice structure lightweight triangulation for additive manufacturing. *Computer-Aided Design* (2017).

CLAUSEN ET AL. 2009

Clausen, B.; Frerichs, F.; Kohlhoff, T.; Lübben, T.; Prinz, C.; Rentsch, R.; Sölter, J.; Surm, H.; Stöbener, D.; Klein, D.: Identification of process parameters affecting distortion of disks for gear manufacture - Part II: heating, carburizing, quenching. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 40 (2009) 5-6, S. 361-367.

CLEES ET AL. 2010

Clees, T.; Steffes-lai, D.; Helbig, M.; Sun, D.-Z.: Statistical Analysis and Robust Optimization of Forming Processes and Forming-to-Crash Process Chains. *International Journal of Material Forming* 3 (2010) S1, S. 45-48.

CONCLI ET AL. 2021

Concli, F.; Bonaiti, L.; Gerosa, R.; Cortese, L.; Nalli, F.; Rosa, F.; Gorla, C.: Bending Fatigue Behavior of 17-4 PH Gears Produced by Additive Manufacturing. *Applied Sciences* 11 (2021).

DAMON ET AL. 2019

Damon, J.; Koch, R.; Kaiser, D.; Graf, G.; Dietrich, S.; Schulze, V.: Process development and impact of intrinsic heat treatment on the mechanical performance of selective laser melted AISI 4140. Additive Manufacturing 28 (2019), S. 275-284.

DENNIG ET AL. 2021

Dennig, H.-J.; Zumofen, L.; Stierli, D.; Kirchheim, A.; Winterberg, S.: Increasing the safety against scuffing of additive manufactured gear wheels by internal cooling channels. Forschung im Ingenieurwesen 106 (2021).

DENNIG ET AL. 2022

Dennig, H.-J.; Kirchheim, A.; Winterberg, S.; Zumofen, L.: Function and weight optimized gear components by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Vortragsreihe Zürich. 2022.

DIETRICH 2019

Dietrich, S.: Lichtbogenbasierte Pulverherstellung für die additive Fertigung. Dissertation Technische Universität München (2019).

DILIP ET AL. 2017

Dilip, J. J.; Zhang, S.; Teng, C.; Zeng, K.; Robinson, C.; Pal, D.; Stucker, B.: Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. Progress in Additive Manufacturing 2 (2017) 3, S. 157-167.

DIN 17022-3 1989

DIN 17022-3: Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen; Verfahren der Wärmebehandlung; Einsatzhärten (1989).

DIN 3990-2 1987

DIN 3990-2: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Berechnung der Grübchentragfähigkeit (1987).

DIN 3990-3 1987

DIN 3990-3: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit (1987).

DIN 3990-6 1994

DIN 3990-6: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Teil 6: Betriebsfestigkeitsrechnung (1994).

DIN 8580-1 2020

DIN 8580-1: DIN 8580-1 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung (2020).

DIN EN ISO 17296-2 2016

DIN EN ISO 17296-2: Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (2016).

DIN EN ISO/ASTM 52900-06 2018

DIN EN ISO/ASTM 52900-06: Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (2018).

DIN EN ISO/ASTM 52907 2020

DIN EN ISO/ASTM 52907: DIN EN ISO/ASTM 52907. Additive manufacturing – Feedstock materials – Methods to characterize metal powders (2020) 5.

DIN ISO 14635-1 2006

DIN ISO 14635-1: Zahnräder - FZG-Prüfverfahren - Teil 1: FZG-Prüfverfahren A/8,3/90 zur Bestimmung der relativen Fresstragfähigkeit von Schmierölen. Auflage 5 (2006).

DONG ET AL. 2018

Dong, Z.; Zhang, X.; Shi, W.; Zhou, H.; Lei, H.; Liang, J.: Study of Size Effect on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Samples Made by Selective Laser Melting. *Materials* (2018).

DOWLING ET AL. 2020

Dowling, L.; Kennedy, J.; O'Shaughnessy, S.; Trimble, D.: A review of critical repeatability and reproducibility issues in powder bed fusion. *Materials & Design* 186 (2020).

EHRENSPIEL ET AL. 2007

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Hundal, M. S.; Lindemann, U.: *Cost-efficient design*. Heidelberg, New York: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-34648-7.

EISEN 2009

Eisen, M. A.: *Optimierte Parameterfindung und prozessorientiertes Qualitätsmanagement für das Selective-Laser-Melting-Verfahren*. Dissertation Universität Duisburg-Essen (2009).

ENGELBRECHT ET AL. 2009

Engelbrecht, S.; Folgar, L.; Rosen, D.; Schulberger, G.; Williams, J.: *Cellular Structures for Optimal Performance*. Proceedings of the 20th Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin (TX) (2009).

ESCHEY 2013

Eschey, C.: *Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung*. Dissertation Technische Universität München (2013).



FAROUN 2021

Faroun, R.: KitkAdd: leveraging Additive Manufacturing and Powder Metallurgy for hybrid manufacturing. <<https://news.pminnovationblog.com/blog/kitkadd-leveraging-additive-manufacturing-and-powder-metallurgy-for-hybrid-manufacturing>> - 03/06/2021 19:16:29.

FELDHUSEN & GROTE 2013

Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013. ISBN: 978-3-642-29568-3.

FELTEN 2018

Felten, K.: Verzahntechnik. Das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahnrädern. expert-Verlag GmbH Fachverlag für Wirtschaft und Technik. 5. Auflage. Renningen: Expert 2018. ISBN: 978-3-8169-3441-7.

FEUERHAHN ET AL. 2013

Feuerhahn, F.; Schulz, A.; Seefeld, T.; Vollertsen, F.: Microstructure and Properties of Selective Laser Melted High Hardness Tool Steel. Physics Procedia 41 (2013), S. 843-848.

FIEBER 2020

Fieber, R.: Betrachtung des Verzugverhaltens von leichtbauoptimierten, additiv gefertigten Bauteilen bei einer Wärmebehandlung. Bachelorarbeit Universität Augsburg (2020).

FUNCH ET AL. 2022

Funch, C. V.; Christiansen, T. L.; Somers, M. A.J.: Gaseous nitriding of additively manufactured maraging steel; nitriding kinetics and microstructure evolution. Surface and Coatings Technology 17 (2022).

FVA-Richtlinie 563/I

FVA 563/I: Vereinheitlichung von Tragfähigkeitsversuchen – Empfehlungen zur Vereinheitlichung von Tragfähigkeitsversuchen an vergüteten und gehärteten Zylinderrädern. Frankfurt am: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2012).

GAO ET AL. 2015

Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; Wang, C. C.L.; Shin, Y. C.;Zhang, Song; Zavattieri, Pablo D.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design 69 (2015), S. 65-89.

GEBHARDT 2016

Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-

Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser 2016. ISBN: 9783446445390.

GEENEN ET AL. 2019

Geenen, K.; Röttger, A.; Feld, F.; Theisen, W.: Microstructure, mechanical, and tribological properties of M3:2 high-speed steel processed by selective laser melting, hot-isostatic pressing, and casting. *Additive Manufacturing* 28 (2019), S. 585-599.

GEGNER ET AL. 2012

GEGNER ET AL.: Alloy Dependence of the Diffusion Coefficient of Carbon in Austenite and Analysis of Carburization Profiles in Case Hardening of Steels. Israel, 2012. ISBN: 10.13140/2.1.3871.2646.

GERSTL 2021

Gerstl, F.: Einfluss der Belichtungsparameter und der Geometrie auf den Werkstoffzustand anhand des Werkstoffs 16MnCr5 in der additiven Fertigung. Bachelorarbeit Hochschule Aalen (2021).

GOTTWALT 2019

Gottwalt, A.: Maßnahmen zur In-Situ-Beeinflussung von Gefügeeigenschaften des Einsatzstahls 16MnCr5 beim Laserstrahlschmelzen. Masterarbeit Technische Hochschule Ingolstadt (2019).

GÖTZE ET AL. 2011

Götze, U.; Hache, B.; Schmidt, A.; Weber, T.: Methodik zur kostenorientierten Bewertung von Prozessketten der Werkstoffverarbeitung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42 (2011) 7, S. 647-657.

GÖTZE ET AL. 2013.

Götze, U.; Zönnchen, S.; Schönherr, J.: Wirtschaftliche Bewertung von Prozesskettenvarianten am Beispiel von Strukturbauteilen. *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodensworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Wissenschaftliche Scripten (2013.).

GROBMANN 2020

Großmann, A.: Fertigungsgetriebene Gestaltung zellulärer Strukturen beim pulverbasierten Laserstrahlschmelzen. Dissertation Technische Universität Darmstadt (2020).

GU ET AL. 2013

Gu, H.; Gong, H.; Pal, D.; Rafi, K.; Starr, T.; Stucker, B.: Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted 17-4PH Stainless Steel. 24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (2013).

GU 2015

Gu, D.: Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015. ISBN: 978-3-662-46088-7.

GUNENTHIRAM ET AL. 2018

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

GUPTA ET AL. 2016

Gupta, K.; Laubscher, R. F.; Davim, J. P.; Jain, N. K.: Recent developments in sustainable manufacturing of gears. A review. Journal of Cleaner Production 112 (2016), S. 3320-3330.

HAASE ET AL. 2017

Haase, C.; Bültmann, J.; Hof, J.; Ziegler, S.; Bremen, S.; Hinke, C.; Schwedt, A.; Prah, U.; Bleck, Wolfgang: Exploiting Process-Related Advantages of Selective Laser Melting for the Production of High-Manganese Steel. Materials (2017).

HAECKEL ET AL. 2017

Haeckel, F.; Meixlsperger, M.; Burkert, T.: Technological challenges for automotive series production in laser beam melting Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International (2017).

HAECKEL 2020

Haeckel, F.: Reproduzierbarkeit des Laserstrahlschmelzens im Hinblick auf einen Einsatz in der automobilen Serienproduktion. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2020).

HANDSCHUH ET AL. 2013

Handschuh, R. F.; Roberts, G. D.; Sinnamon, R. R.; Stringer, D. B.; Dykas, B. D.; Kohlman, L. W.: Hybrid Gear Preliminary Results - Application of Composites to Dynamic Mechanical Components. Gear Technology (2013).

HANZL ET AL. 2015

Hanzl, P.; Zetek, M.; Bakša, T.; Kroupa, T.: The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts. *Procedia Engineering* 100 (2015), S. 1405-1413.

HE & LIU 2008

He, D.; Liu, S.: BESO method for topology optimization of structures with high efficiency of heat dissipation. *International Journal for Simulation and Multi-disciplinary Design Optimization* 2 (2008) 1, S. 43-48.

HEARN 2021

Hearn, W.: Laser Based Powder Bed Fusion of Plain Carbon and Low-Alloy Steels: Microstructure and Processability. Dissertation. Chalmers University of Technology (2021).

HENNING & MOELLER 2020

Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2020. ISBN: 9783446459847.

HERNÁNDEZ-NAVA ET AL. 2015

Hernández-Nava, E.; Smith, C. J.; Derguti, F.; Tammam-Williams, S.; Léonard, F.; Withers, P. J.; Todd, I.; Goodall, R.: The effect of density and feature size on mechanical properties of isostructural metallic foams produced by additive manufacturing. *Acta Materialia* 85 (2015), S. 387-395.

HEß 2015

Heß, T.: Beitrag zur Qualifizierung des pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzens zur Serienfertigung am Beispiel der Triebwerksindustrie. Dissertation Karlsruher Institut für Technologie (2015).

HIPPENSTIEL ET AL. 2002

HIPPENSTIEL ET AL.: Über den Einfluss von Vorwärmebehandlungen an Einsatzstählen auf die mechanische Bearbeitbarkeit und die Maß- und Formänderung, 58. Härterei-Kolloquium. Wiesbaden, 2002: Hanser.

HOFFMANN ET AL. 2018

Hoffmann, F.; Kleff, J.; Strunk, R.; Clausen, B.: Influence of process chains on heat treatment. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 49 (2018) 6, S. 792-802.

HONDA 2020

Honda, M.: How Honda Ditched Conventional Thinking to Design a Lighter Crankshaft. <<https://redshift.autodesk.com/crankshaft-design/>> - 03/04/2021 16:30:46.

HOOPER 2018

Hooper, P. A.: Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing* 22 (2018), S. 548-559.

HÖSEL & JOACHIM 1978

Hösel, T.; Joachim, F.: Zahnflankenwälzfestigkeit unter Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeit. *Antriebstechnik* 17. *Antriebstechnik* (1978) 12, S. 533-537.

HOU ET AL. 2020

Hou, L.; Lei, Y.; Fu, Y.; Hu, J.: Effects of lightweight gear blank on noise, vibration and harshness for electric drive system in electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics* 234 (2020) 3, S. 447-464.

HUANG & XIE 2010

Huang, X.; Xie, Y. M.: Comparing BESO with Other Topology Optimization Methods. In: Huang, X. et al. (Hrsg.): *Evolutionary topology optimization of continuum structures. Methods and applications*. Chichester, West Sussex, U.K, Hoboken, NJ: Wiley 2010, S. 51-63. ISBN: 9780470689486.

HUSSEIN ET AL. 2013

Hussein, A.; Hao, L.; Yan, C.; Everson, R.; Young, P.: Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 7, S. 1019-1026.

INAYATHUALLA 2019

Inayathualla, S.: Influence of heat treatment on the mechanical properties and the microstructure of additively manufactured 16MnCr5 lightweight structures. *Masterarbeit Universität Kiel* (2019).

ISO 6336-2 2019

ISO 6336-2: Tragfähigkeitsberechnung von gerad- und schrägverzahnten Stirnrädern - Teil 2: Berechnung der Grübchentragfähigkeit (2019).

ISO 6336-3 2019

ISO 6336-3: Tragfähigkeitsberechnung von gerad- und schrägverzahnten Stirnrädern - Teil 3: Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit (2019).

ISO 6336-5 2016

ISO 6336-5: Tragfähigkeitsberechnung von gerad- und schrägverzahnten Stirnrädern - Teil 5: Festigkeit und Werkstoffqualitäten (2016).

JANSEN 2018

Jansen, D.: Bionischer Leichtbau in der Zahnradherstellung durch Einsatz additiver Fertigung. Bachelorarbeit Hochschule für angewandte Wissenschaften München (2018).

JÄRVINEN ET AL. 2014

Järvinen, J.-P.; Matilainen, V.; Li, X.; Piili, H.; Salminen, A.; Mäkelä, I.; Nyrhilä, O.: Characterization of Effect of Support Structures in Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel. *Physics Procedia* 56 (2014), S. 72-81.

JELIS ET AL. 2015

Jelis, E.; Clemente, M.; Kerwien, S.; Ravindra, N. M.; Hespos, M. R.: Metallurgical and Mechanical Evaluation of 4340 Steel Produced by Direct Metal Laser Sintering. *JOM* 67 (2015) 3, S. 582-589.

JELIS 2017

Jelis, E.: Development of low alloy steel by direct metal laser sintering. Dissertation New Jersey Institute of Technology. New Jersey (2017).

JIANG ET AL. 2011

Jiang, K.; Huang, C.; Liu, B.: Part decomposing algorithm based on STL solid model used in shape deposition manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54 (2011) 1-4, S. 187-194.

KAFFENBERGER 2013

Kaffenberger, M.: Vorhersage des Einsatzhärtungsergebnisses aus dem Aufkohlungsprofil und den Abschreck- und Anlassbedingungen. Dissertation Universität Siegen (2013).

KAMPS ET AL. 2016

Kamps, T.; Gralow, M.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Systematische Bionische Bauteilgestaltung zur Ausschöpfung des AM-Designpotenzials. *Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing* (2016).

KAMPS ET AL. 2017

Kamps, T.; Gralow, M.; Schlick, G.; Reinhart, G.: Systematic Biomimetic Part Design for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 65 (2017), S. 259-266.

KAMPS ET AL. 2018

Kamps, T.; Lutter-Guenther, M.; Seidel, C.; Gutowski, T.; Reinhart, G.: Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 21 (2018), S. 47-60.

KAMPS 2018

Kamps, T.: Leichtbau von Stirnzahnrädern aus Einsatzstahl mittels Laserstrahlschmelzen. Dissertation Technische Universität München (2018).

KEMPEN ET AL. 2014

Kempen, K.; Vrancken, B.; Buls, S.; Thijs, L.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating. Journal of Manufacturing Science and Engineering 136 (2014).

KEMPTER 2020

Kempter, B.: Anforderungsgerechte Auslegung von Stützstrukturen für additiv gefertigte Bauteile aus Einsatzstahl (16MnCr5). Masterarbeit Hochschule Aalen (2020).

KING ET AL. 2014

King, W. E.; Barth, H. D.; Castillo, V. M.; Gallegos, G. F.; Gibbs, J. W.; Hahn, D. E.; Kamath, C.; Rubenchik, A. M.: Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 12, S. 2915-2925.

KLAHN 2015

Klahn, C.: Laseradditiv gefertigte, luftdurchlässige Mesostrukturen. Dissertation Technische Universität Hamburg (2015).

KLEE & LANTZSCH 2021

Klee, L.; Lantzsch, T.: Additive Fertigungsprozessketten für Zahnräder. Abschlussbericht FVA 759 II (2021).

KLEIN 2012

Klein, M.: Zur Fresstragfähigkeit von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. Dissertation Technische Universität München (2012).

KLEIN 2013

Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 10., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3-658-02272-3. (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

KLOCKE & BRECHER 2017

Klocke, F.; Brecher, C.: Zahnrad- und Getriebetechnik. Auslegung - Herstellung - Untersuchung - Simulation. Carl Hanser Verlag. München: Carl Hanser Verlag 2017. ISBN: 3446430687.

KLUGE ET AL. 2017

Kluge, M.; Kotthoff, G.; Cavallini, C.; Holzinger, V.: Design and production of

innovative transmission components with additive manufacturing. 16th International CTI Symposium Automotive Transmissions, HEV and EV Drives (2017).

KOHLHOFF ET AL. 2012

Kohlhoff, T.; Prinz, C.; Rentsch, R.; Surm, H.: Influence of manufacturing parameters on gear distortion. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 43 (2012) 1-2, S. 84-90.

KOK ET AL. 2018

Kok, Y.; Tan, X. P.; Wang, P.; Nai, M.L.S.; Loh, N. H.; Liu, E.; Tor, S. B.: Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials & Design* 139 (2018) 3, S. 565-586.

KOLLER ET AL. 2010

Koller, P.; Tobie, T.; Höhn, B.-R.: Optimierung Flankentragfähigkeit Abschlussbericht – Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Kombination von Strahlbehandlung und Finishingprozess (2010).

KONOWALCZYK ET AL. 2017

Konowalczyk, P.; Ziebura, D.; Witzel, J.: Potenzial generativ gefertigter Bauteile in der Getriebetechnik. FVA 759 - Studie 3D-Druck (2017).

KOPTYUG ET AL. 2020

Koptyug, A.; Popov, V. V.; Botero Vega, C. A.; Jiménez-Piqué, E.; Katz-Demyanetz, A.; Rännar, L.-E.; Bäckström, M.: Compositionally-tailored steel-based materials manufactured by electron beam melting using blended pre-alloyed powders. *Materials Science and Engineering: A* 771 (2020).

KRAKHMALOV ET AL. 2015

Krakhmalev, P.; Yadroitsava, I.; Fredriksson, G.; Yadroitsev, I.: In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels. *Materials & Design* 87 (2015), S. 380-385.

KRANZ ET AL. 2015

Kranz, J.; Herzog, D.; Emmelmann, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications* 27 (2015).

KRAUSS 2016

Krauss, H.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung. Dissertation Technische Universität München (2016).



KROL ET AL. 2013

Krol, T. A.; Seidel, C.; Zaeh, M. F.: Prioritization of Process Parameters for an Efficient Optimisation of Additive Manufacturing by Means of a Finite Element Method. *Procedia CIRP* 12 (2013), S. 169-174.

KUDZAL ET AL. 2017

Kudzal, A.; McWilliams, B.; Hofmeister, C.; Kellogg, F.; Yu, J.; Taggart-Scarff, J.; Liang, J.: Effect of scan pattern on the microstructure and mechanical properties of Powder Bed Fusion additive manufactured 17-4 stainless steel. *Materials & Design* 133 (2017), S. 205-215.

KUDZAL ET AL. 2020

Kudzal, A. D.; McWilliams, B. A.; Taggart-Scarff, J.; Knezevic, M.: Fabrication of a low alloy ultra-high strength (>1500 MPa yield) steel using powder bed fusion additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A* (2020).

KUNZ ET AL. 2018

Kunz, J.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Broeckmann, C.; Saewe, J.; Gayer, C.; Schleifenbaum, J. H.: Influence of powder bed temperature on microstructure and post heat treatment of high speed steel AISI M50 processed by laser powder bed fusion. *Proceeding Euro PM 2018* (2018).

KUNZ ET AL. 2020

Kunz, J.; Saewe, J.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Schleifenbaum, J. H.; Broeckmann, C.: Mechanical Properties of High-Speed Steel AISI M50 Produced by Laser Powder Bed Fusion. *Steel Research International* 91 (2020).

LAMMERS ET AL. 2017

Lammers, S.; Quattrone, F.; Mrozek, R.; Zimmer, D.; Schmid, H.; Ponikc, B.; Hoffmann, M.: Entwicklung und additive Herstellung einer Leichtbau- Rotorwelle für eine permanentmagneterregte Synchronmaschine. *Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing* (2017).

LANZA ET AL. 2017

Lanza, G.; Kopf, R.; Zaiß, M.; Stricker, N.; Eschner, N.; Yang, S.: Laser-Strahlschmelzen - Technologie mit Zukunftspotenzial. *Ein Handlungsleitfaden* (2017).

LEICHT ET AL. 2020

Leicht, A.; Yu, C. H.; Luzin, V.; Klement, U.; Hryha, E.: Effect of scan rotation on the microstructure development and mechanical properties of 316L parts produced by laser powder bed fusion. *Materials Characterization* 163 (2020).

LEIRMO & MARTINSEN 2020

Leirmo, T. S.; Martinsen, K.: Deterministic part orientation in additive manufacturing using feature recognition. *Procedia CIRP* 88 (2020), S. 405-410.

LEONHARDT ET AL. 2020

Leonhardt, C.; Benkert, T.; Meißner, R.; Nadolski, D.; Otto, M.; Stahl, K.: Intelligenter Leichtbau durch Mehrkomponentenverfahren. *Massiver Leichtbau. Abschlussbericht FVA-Nummer 754 I* (2020).

LI ET AL. 2017

Li, B.; Hong, J.; Yan, S.; Liu, H.; Ge, L.: Generating optimal heat conduction paths based on bionic growth simulation. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 83 (2017), S. 55-63.

LI ET AL. 2019

Li, X.; Tan, Y. H.; Willy, H. J.; Wang, P.; Lu, W.; Cagirici, M.; Ong, C. Y.; Heng, T. S.; Wei, Jun; Ding, Jun: Heterogeneously tempered martensitic high strength steel by selective laser melting and its micro-lattice: Processing, microstructure, superior performance and mechanisms. *Materials & Design* 178 (2019).

LIEBHERR 2019

Liebherr: Verzahnung: Wie Liebherr die Fertigung von E-Bikes unterstützt. <<https://www.digital-engineering-magazin.de/verzahnung-wie-hat-liebherr-die-fertigen-von-e-bikes-unterstuetzt/>> - 25.06.2021.

LIEDTKE 2003

Liedtke, D.: Über den Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffgehalt in Stählen und der Härte des Martensits. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* (2003) 34.

LIEDTKE 2008

Liedtke, D.: Merkblatt 452 "Einsatzhärten" (2008).

LINDECKE ET AL. 2018

Lindecke, J.; Nils, P.; Blunk, H.; Wenzl, J.-P.; Möller, M.; Emmelmann, C.: Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts. *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 53-58.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korrigierte Aufl.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009. ISBN: 978-3-642-01422-2. (VDI-Buch).

LINKE & NAST 2015

Linke, M.; Nast, E.: Festigkeitslehre für den Leichtbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015.

LIPPERT 2018

Lippert, R. B.: Restriktionsgerechtes Gestalten gewichtsoptimierter Strukturbau-  
teile für das Selektive Laserstrahlschmelze. Dissertation Gottfried Wilhelm Leib-  
niz Universität Hannover (2018).

LIU ET AL. 2020

Liu, J.; Song, Y.; Chen, C.; Wang, X.; Li, H.; Zhou, C.'a.; Wang, J.; Guo, K.;  
Sun, Jie: Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior  
of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*  
186 (2020).

LIU ET AL. 2022

Liu, M.; Chiu, L. N.S.; Shen, H.; Fang, X.; Tao, Z.; Huang, A.; Davies, C.; Wu,  
X.; Yan, Wenyi: Effective thermal conductivities of metal powders for additive  
manufacturing. *Powder Technology* 401 (2022).

LIVERANI ET AL. 2017

Liverani, E.; Toschi, S.; Ceschini, L.; Fortunato, A.: Effect of selective laser mel-  
ting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of  
316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* 249  
(2017), S. 255-263.

LÜBBEN ET AL. 2016

Lübben, T.; Surm, H.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Identification of design rela-  
ted distortion of gear base bodies by experimental investigations. *Materialwis-  
senschaft und Werkstofftechnik* 47 (2016), S. 678-687.

LÜBBEN ET AL. 2017

Lübben, T.; Surm, H.; Steinbacher, M.: Konstruktions- und größenbedingte Ein-  
flüsse auf den Verzug von ölabgeschreckten Zahnradgrundkörpern. *HTM Journal  
of Heat Treatment and Materials* (2017).

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2016

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

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2017

Lutter-Günther, M.; Horn, M.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Einfluss der Korngrößenverteilung auf Fließfähigkeit und Bauteilqualität beim Laserstrahlschmelzen. In: Kynast, M. et al. (Hrsg.): Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2017, S. 297-311. ISBN: 978-3-446-45459-0.

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018a

Lutter-Günther, M.; Gebbe, C.; Kamps, T.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Powder recycling in laser beam melting: strategies, consumption modeling and influence on resource efficiency. *Production Engineering* 12 (2018) 3-4, S. 377-389.

LUTTER-GÜNTHER ET AL. 2018b

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

LUTTER-GÜNTHER 2020

Lutter-Günther, M.: Qualitätsorientiertes und modellbasiertes Pulverrecycling beim Laserstrahlschmelzen. Dissertation Technische Universität München (2020).

ŁYCZKOWSKA ET AL. 2014

Łyczkowska, E.; Szymczyk, P.; Dybała, B.; Chlebus, E.: Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14 (2014) 4, S. 586-594.

MAHNKEN 2012

Mahnken, R.: *Lehrbuch der Technischen Mechanik - Statik. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-642-21711-1. (Springer-Lehrbuch 5023).

MALLOW ET AL. 2021

Mallow, S.; Schmitt, M.; Gebauer, M.; Reich, M.; Stockburger, M.; Kessler, O.: Einsatzhärten eines additiv gefertigten Stahls 20MnCr5. *AWT – Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung + Werkstofftechnik e. V.* 2021.

MASKERY ET AL. 2016

Maskery, I.; Aboulkhair, N. T.; Aremu, A. O.; Tuck, C. J.; Ashcroft, I. A.; Wildman, R. D.; Hague, R.J.M.: A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* 670 (2016), S. 264-274.

MASUCH 2020

Masuch, T.: »Erkennen Sie den Bachkiesel wieder?«. <<https://fon-mag.de/high-light-storys/2020-06-am-bei-andritz-kaiser/>> - 03/08/2021 17:21:34.

MEINERS 1999

Meiners, W.: Direktes selektives Laser-Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1999).

MEREDITH ET AL. 2018

Meredith, S. D.; Zuback, J. S.; Keist, J. S.; Palmer, T. A.: Impact of composition on the heat treatment response of additively manufactured 17–4 PH grade stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 738 (2018), S. 44-56.

MERKT 2015

Merkt, S. J.: Qualifizierung von generativ gefertigten Gitterstrukturen für maßgeschneiderte Bauteilfunktionen. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2015).

MERTENS ET AL. 2016

Mertens, R.; Vrancken, B.; Holmstock, N.; Kinds, Y.; Kruth, J.-P.; van Humbeeck, J.: Influence of Powder Bed Preheating on Microstructure and Mechanical Properties of H13 Tool Steel SLM Parts. *Physics Procedia* 83 (2016), S. 882-890.

MERTENS ET AL. 2018

Mertens, R.; Dadbakhsh, S.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: Application of base plate preheating during selective laser melting. *Procedia CIRP* 74 (2018), S. 5-11.

MERTENS ET AL. 2020

Mertens, A.; Delahaye, J.; Dedry, O.; Vertruyen, B.; Tchuindjang, J. T.; Habracken, A. M.: Microstructure and Properties of SLM AlSi10Mg: Understanding the Influence of the Local Thermal History. *Procedia Manufacturing* 47 (2020), S. 1089-1095.

MOHR ET AL. 2020

Mohr, G.; Altenburg, S. J.; Hilgenberg, K.: Effects of inter layer time and build height on resulting properties of 316L stainless steel processed by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing* 32 (2020), S. 101080.

MORGAN ET AL. 2017

Morgan, D.; Agba, E.; Hill, C.: Support Structure Development and Initial Results for Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 10 (2017), S. 819-830.

MUGWAGWA ET AL. 2018

Mugwagwa, L.; Dimitrov, D.; Matope, S.; Yadroitsev, I.: Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting. *Procedia Manufacturing* 21 (2018), S. 92-99.

MÜLLER ET AL. 2019

Müller, A. v.; Schlick, G.; Neu, R.; Anstatt, C.; Klimkait, T.; Lee, J.; Pascher, B.; Schmitt, M.; Seidel, C.: Additive manufacturing of pure tungsten by means of selective laser beam melting with substrate preheating temperatures up to 1000 °C. *Nuclear Materials and Energy* 19 (2019), S. 184-188.

MUNSCH 2013

Munsch, M.: Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug in der laseradditiven Fertigung. Dissertation Technische Universität Hamburg (2013).

MUNSCH ET AL. 2018

Munsch, M.; Schmidt-Lehr, M.; Wycisk, E.: Additive Manufacturing of Automotive Components. *AMPower Insights* 2 (2018).

MUNSCH ET AL. 2020

Munsch, M.; Schmidt-Lehr, M.; Wycisk, E.: *AMPower-Insights-vol.-6-New-Technologies*. *AMPower Insights* - 6 (2020).

MYERHOLTZ ET AL. 2016

Myerholtz, B.; Tevelson, R.; Wood, E.: *The Design-to-Value Advantage: Developing Winning Products with the Best Economics*. Germany - DE.

<<https://www.bcg.com/de-de/publications/2016/procurement-operations-design-value-advantage-developing-winning-products-best-economics>> - 09/20/2021 18:21:49.

NACHTIGALL & WISSER 2013

Nachtigall, W.; Wissler, A.: *Bionik in Beispielen. 250 illustrierte Ansätze*. Berlin: Springer Spektrum 2013. ISBN: 9783642347672.

NAKAMOTO ET AL. 2009

Nakamoto, T.; Shirakawa, N.; Miyata, Y.; Inui, H.: Selective laser sintering of high carbon steel powders studied as a function of carbon content. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 15-16, S. 5653-5660.

NARRA 2017

Narra, S. P.: *Melt Pool Geometry and Microstructure Control Across Alloys in Metal Based Additive Manufacturing Processes*. Dissertation Carnegie Mellon University (2017).

NIEMANN & WINTER 2003

Niemann, G.; Winter, H.: Maschinenelemente. Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe. Zweite, völlig neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2003. ISBN: 9783662118740.

NOVAK & NOVAK 2014

Schutzrecht DE102013005338A1 2014Novak, W.; Novak, M.: Zahnrad.

OVER 2003

Over, C.: Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit 'Selective Laser Melting'. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2003).

PANESAR ET AL. 2017

Panesar, A.; Ashcroft, I.; Brackett, D.; Wildman, R.; Hague, R.: Design framework for multifunctional additive manufacturing: Coupled optimization strategy for structures with embedded functional systems. Additive Manufacturing 16 (2017) 6307, S. 98-106.

PARRISH 1980

Parrish, G.: The influence of microstructure on the properties of case-carburized components. Ohio: American Society for Metals 1980. ISBN: 9780871700902.

PAUZON ET AL. 2020

Pauzon, C.; Pierre Forêt; Eduard Hryha; Tanja Arunprasad; Lars Nyborg: Argon-helium mixtures as Laser-Powder Bed Fusion atmospheres: Towards increased build rate of Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology 279 (2020).

PAUZON 2021

Pauzon, C.: Tailored process gases for laser powder bed fusion. Dissertation Chalmers University of Technology (2021).

PHUTELA ET AL. 2019

Phutela, C.; Aboulkhair, N. T.; Tuck, C. J.; Ashcroft, I.: The Effects of Feature Sizes in Selectively Laser Melted Ti-6Al-4V Parts on the Validity of Optimised Process Parameters. Materials 13 (2019).

PLATT ET AL. 2018

Platt, S.; Wegner, J.; Kleszczynski, S.; Witt, G.: Effect of scan strategy, re-melting and exposure time on the microstructure of stainless steel 17-4 PH fabricated by laser powder bed fusion of metals. Proceedings of 7th International Conference on Additive Technologies (2018).

POLITIS 2017

Politis, N.: Forging Lightweight Bimetal Gears. Dissertation Imperial College London (2017).

POLITIS ET AL. 2021

Politis, D. J.; Politis, N. J.; Lin, J.: Review of recent developments in manufacturing lightweight multi-metal gears. *Production Engineering* 21 (2021) 2, S. 109.

PORSCHE 2020

Porsche: Innovative Kolben aus dem 3D-Drucker für mehr Leistung und Effizienz. <<https://newsroom.porsche.com/de/2020/technik/porsche-kooperation-mahle-trumpf-kolben-3d-drucker-leistung-effizienz-911-gt2-rs-21461.html>> - 03/04/2021 16:31:15.

QUITTER 2019

Quitter, D.: Zahnräder aus PEEK-Polymeren für den Antriebsstrang von Automobilen. *konstruktionspraxis*. <<https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/zahnr-aeder-aus-peek-polymeren-fuer-den-antriebsstrang-von-automobilen-a-864610/>> - 03/08/2021 13:31:39.

RAFI ET AL. 2014

Rafi, H. K.; Pal, D.; Patil, N.; Starr, T. L.; Stucker, B. E.: Microstructure and Mechanical Behavior of 17-4 Precipitation Hardenable Steel Processed by Selective Laser Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23 (2014) 12, S. 4421-4428.

REHME 2009

Rehme, O.: Cellular Design for Laser Freeform Fabrication. Dissertation Technische Universität Hamburg (2009).

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Reinhardt, S.; Föckerer, T.; Zäh, M. F.: Comparison of the Resource Efficiency of Alternative Process Chains for Surface Hardening. In: Hesselbach, J. et al. (Hrsg.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 311-316. ISBN: 978-3-642-19691-1.

REINHART & TEUFELHART 2011

Reinhart, G.; Teufelhart, S.: Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures. *Physics Procedia* 12 (2011), S. 385-392.



REINHART & TEUFELHART 2013

Reinhart, G.; Teufelhart, S.: Optimization of Mechanical Loaded Lattice Structures by Orientating their Struts Along the Flux of Force. *Procedia CIRP* 12 (2013), S. 175-180.

RENAULT 2017

Renault, T.: Zukunftsweisender 3D-Metalldruck - Newsroom - Unternehmen - Renault Trucks Deutschland. <<https://3druck.com/objects/renault-trucks-setzt-auf-metall-3d-druck-fuer-leichtere-und-kompaktere-motoren-5653437/>> - 03/04/2021 16:30:36.

RIENER ET AL. 2020

Riener, K.; Albrecht, N.; Ziegelmeier, S.; Ramakrishnan, R.; Haferkamp, L.; Spierings, A. B.; Leichtfried, G. J.: Influence of particle size distribution and morphology on the properties of the powder feedstock as well as of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion (LPBF). *Additive Manufacturing* 34 (2020).

ROACH ET AL. 2020

Roach, A. M.; White, B. C.; Garland, A.; Jared, B. H.; Carroll, J. D.; Boyce, B. L.: Size-dependent stochastic tensile properties in additively manufactured 316L stainless steel. *Additive Manufacturing* 32 (2020) 1.

ROOS & MAILE 2015

Roos, E.; Maile, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. 5. Aufl.* Berlin: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-642-54989-2. (Springer-Lehrbuch).

ROSSWAG GMBH 2019

Rosswag GmbH: Neuigkeiten zu den Aktivitäten von Rosswag Engineering zum Metall 3D-Druck | Rosswag GmbH. <<https://www.rosswag-engineering.de/news?l2175240742l=388&l2001808203l=1>> - 19.3.2020.

SANDER 2018

Sander, J.: *Selektives Laserschmelzen hochfester Stähle. Dissertation Technische Universität Dresden* (2018).

SANTI

SCHUTZRECHT US000005852951A Santi, J.: *Composite Gear and Method of Making Same.*

SCHEITLER ET AL. 2016

Scheitler, C.; Rothfelder, R.; Rasch, M.; Ahuja, B.; Schmidt, M.; Merklein, C.;

Beer, O.: Laser Beam Melting of M50NiL: Influence of Inert Gas Flow on Resulting Part Properties. Proceedings of 6th International Conference on Additive Technologies (2016).

SCHLICK 2017

Schlick, G.: Selektives Laserstrahlschmelzen von schwer schweißbaren Nickelbasis-Superlegierungen. Dissertation. Universität Bayreuth (2017).

SCHMITT ET AL. 2018

Schmitt, M.; Schlick, G.; Seidel, C.; Reinhart, G.: Examination of the Processability of 16MnCr5 by Means of Laser Powder Bed Fusion. Procedia CIRP (2018).

SCHMITT ET AL. 2019a

Schmitt, M.; Jansen, D.; Bihlmeir, A.; Winkler, J.; Anstaett, C.; Schlick, G.; Tobie, T.; Stahl, K.; Reinhart, Gunther: Framework and strategies for the light-weight construction of AM gears for the automotive industry. Proceeding Rapid-Tech 2019 (2019).

SCHMITT ET AL. 2019b

Schmitt, M.; Gottwalt, A.; Machnik, A.; Schlick, G.; Reinhart, G.: Gezielte Einstellung der Werkstoffeigenschaften mittels Laser-Strahlschmelzen. Vortrag - Werkstoffwoche Dresden 2019.

SCHMITT ET AL. 2020a

Schmitt, M.; Bösele, M.; Schlick, S.; Reinhart, G.: Influence of Support Structures on the Microstructure and Mechanical Properties of Case Hardening Steel in Laser Powder Bed Fusion. SSRN Proceedings (2020).

SCHMITT ET AL. 2020b

Schmitt, M.; Kamps, T.; Siglmüller, F.; Winkler, J.; Schlick, G.; Seidel, C.; Tobie, T.; Stahl, K.; Reinhart, Gunther: Laser-based powder bed fusion of 16MnCr5 and resulting material properties. Additive Manufacturing 35 (2020).

SCHMITT ET AL. 2020c

Schmitt, M.; Kempter, B.; Schlick, G.; Reinhart, G.: Parameter identification approach for support structures in laser powder bed fusion and analysis of influencing factors. Procedia CIRP 94 (2020), S. 260-265.

SCHMITT ET AL. 2021a

Schmitt, M.; Gottwalt, A.; Winkler, J.; Tobie, T.; Schlick, G.; Stahl, K.; Tetzlaff, U.; Schilp, J.; Reinhart, Gunther: Carbon Particle In-Situ Alloying of the Case-Hardening Steel 16MnCr5 in Laser Powder Bed Fusion. Metals 11 (2021).

SCHMITT ET AL. 2021b

Schmitt, M.; Gerstl, F.; Boesele, M.; Horn, M.; Schlick, G.; Schilp, J.; Reinhart,

G.: Influence of Part Geometry and Feature Size on the Resulting Microstructure and Mechanical Properties of the Case Hardening Steel 16MnCr5 processed by Laser Powder Bed Fusion. *Procedia CIRP* (2021).

SCHMITT ET AL. 2021c

Schmitt, M.; Mallow, S.; Reich, M.; Gebauer, M.; Müller, B.; Schlick, G.; Schilp, J.: Parameter Optimization for Powder Bed Fusion of the Cases-Hardening Steel 20MnCr5 using a Laser Beam. *Proceeding Euro PM2021* (2021).

SCHMITT ET AL. 2022

Schmitt, M.; Schlick, G.; Schilp, J.: Repeatability of Dimensional Accuracy and Mechanical Properties in Powder Bed Fusion of 16MnCr5 using a Laser Beam. *Procedia CIRP* (2022).

SCHNECK ET AL. 2019

Schneck, M.; Gollnau, M.; Lutter-Günther, M.; Benjamin Haller; Georg Schlick; Marius Lakomic; Gunther Reinhart: Evaluating the Use of Additive Manufacturing in Industry Applications. *Procedia CIRP 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems* (2019).

SCHNECK ET AL. 2021

Schneck, M.; Horn, M.; Schmitt, M.; Seidel, C.; Schlick, G.; Reinhart, G.: Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential. *Progress in Additive Manufacturing* 6 (2021) 4, S. 881-894.

SCHNECK 2021

Schneck, M. M.: *Technology Strategy for Metal-based Additive Manufacturing*. Dissertation Technische Universität München (2021).

SCHNIEDENHARN 2020

Schniedenharn, M.: Einfluss von Fokusshift und Prozessnebenprodukten auf den Laser Powder Bed Fusion Prozess. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2020).

SCHULZE 2010

Schulze, G.: *Die Metallurgie des Schweißens. Eisenwerkstoffe - nichteisenmetallische Werkstoffe*. 4., neu bearbeitete Aufl. Heidelberg, New York: Springer 2010. ISBN: 9783642031823. (VDI-Buch).

SCIPIONI ET AL. 2017a

Scipioni, B. U.; Guss, G.; Wu, S.; Matthews, M. J.; Schoenung, J. M.: In-situ characterization of laser-powder interaction and cooling rates through high-speed

imaging of powder bed fusion additive manufacturing. *Materials & Design* 135 (2017) 3, S. 385-396.

SCIPIONI ET AL. 2017b

Scipioni, U.; Wolfer, A. J.; Matthews, M. J.; Delplanque, J.-P. R.; Schoenung, J. M.: On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting. *Materials & Design* 113 (2017) 1, S. 331-340.

SEELIGER 2021

Seeliger, W.: Warum es wichtig ist, durch Leichtbau die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Unternehmen zu reduzieren. Whitepaper (2021).

SEHRT 2010

Sehrt, J.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzen. Dissertation Universität Duisburg-Essen (2010).

SEIDEL & HAHN 2018

Seidel, W. W.; Hahn, F.: *Werkstofftechnik. Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung*. 11., aktualisierte Auflage. München: Hanser 2018. ISBN: 9783446454156. (Lernbücher der Technik).

SIM ET AL. 2020

Sim, E.; Kim, C.; Kwak, K.-S.; Kim, B.: Optimum interface shape and vibration test for a new transmission helical gear composed of steel and aramid/phenol composite. *Journal of Mechanical Science and Technology* 34 (2020) 4, S. 1629-1634.

SING ET AL. 2018

Sing, S. L.; Wiria, F. E.; Yeong, W. Y.: Selective laser melting of lattice structures: A statistical approach to manufacturability and mechanical behavior. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 49 (2018), S. 170-180.

SING ET AL. 2021

Sing, S. L.; Huang, S.; Goh, G. D.; Goh, G. L.; Tey, C. F.; Tan, J.H.K.; Yeong, W. Y.: Emerging metallic systems for additive manufacturing: In-situ alloying and multi-metal processing in laser powder bed fusion. *Progress in Materials Science* 119 (2021).

SLOTWINSKI ET AL. 2014

Slotwinski, J. A.; Garboczi, E. J.; Stutzman, P. E.; Ferraris, C. F.; Watson, S. S.; Peltz, M. A.: Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology* 119 (2014), S. 460-493.

SONG ET AL. 2019

Song, Y.; Kossack, F.; Bender, B.: Methodisches Entwickeln von Anforderungen in der Produktentwicklung. (Hrsg.): DFX 2019: Proceedings of the 30th Symposium Design for X, 18-19 September 2019, Jesteburg, Germany, 30th Symposium Design for X. 18th-19th September 2019: The Design Society 2019.

STAHL ET AL. 1999

Stahl, K.; Michaelis, K.; Höhn, B.-R.; Winter, H.: Lebensdauerstatistik Abschlussbericht - Leitfaden zur Statistik in der Betriebsfestigkeit (Teil II). FVA-Nr. 304 - Heft 580. FVA (1999).

STAHL 2014

Stahl, K.: Innovative Ansätze für Leichtbau in der mechanischen Antriebstechnik. Vortrag - Kooperationsveranstaltung Leichtbau in der Antriebstechnik. 2014.

STEINBACHER ET AL. 2012

Steinbacher, M.; Surm, H.; Clausen, B.; Lübben, T.; Hoffmann, F.: Methodical investigation of distortion biasing parameters during case hardening of spur wheels. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 43 (2012) 1-2, S. 91-98.

STENICO 2007

Stenico, A.: Werkstoffmechanische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. Dissertation Technische Universität München (2007).

STITTGEN & SCHLEIFENBAUM 2021

Stittgen, T.; Schleifenbaum, J. H.: Simulation of utilization for LPBF manufacturing systems. Production Engineering 15 (2021) 1, S. 45-56.

SURM ET AL. 2016

Surm, H.; Hunkel, M.; Lübben, T.: Identification of design related distortion of gear base bodies by finite element computations. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 47 (2016) 8, S. 688-698.

TAHA ET AL. 2012

Taha, M. A.; Yousef, A. F.; Gany, K. A.; Sabour, H. A.: On selective laser melting of ultra high carbon steel: Effect of scan speed and post heat treatment. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 43 (2012) 11, S. 913-923.

TANG ET AL. 2020

Tang, X.; Zhang, S.; Zhang, C.; Chen, J.; Zhang, J.; Liu, Y.: Optimization of laser energy density and scanning strategy on the forming quality of 24CrNiMo low alloy steel manufactured by SLM. Materials Characterization 170 (2020).

TANG & ZHAO 2016

Tang, Y.; Zhao, Y. F.: A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal* 22 (2016) 3, S. 569-590.

TEUFELHART 2016

Teufelhart, S.: Belastungsoptimiertes Design von Gitterstrukturen für die additive Fertigung nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung. Dissertation Technische Universität München (2016).

THIJS ET AL. 2010

Thijs, L.; Verhaeghe, F.; Craeghs, T.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia* 58 (2010) 9, S. 3303-3312.

THOBEN ET AL. 2012

Thoben, K.-D.; Klein, D.; Wuest, T.; Zoch, H.-W.: Knowledge and planning system for distortion engineering. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 43 (2012) 1-2, S. 192-198.

THOMPSON ET AL. 2016a

Thompson, M. K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R. I.; Gibson, I.; Bernard, A.; Schulz, J.; Graf, Patricia; Ahuja, Bhriju; Martina, Filomeno: Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals* 65 (2016) 2, S. 737-760.

THOMPSON ET AL. 2016b

Thompson, M. K.; Stolfi, A.; Mischkot, M.: Process chain modeling and selection in an additive manufacturing context. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 12 (2016), S. 25-34.

TOBIAS KAMPS 2018

Tobias Kamps: Leichtbau von Stirnzahnrädern aus Einsatzstahl mittels Laserstrahlschmelzen. Technische Universität München. München (2018).

TOBIE 2001

Tobie, T.: Zur Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. Dissertation Technische Universität München (2001).

TRAUTMANN 2021

Trautmann, S.: GKN PM identifies industrial potential of DP 600 steel. <<https://www.gknpm.com/en/news-and-media/news-releases/2020/the-evolution-of-metal-3d-printing/>> - 03/04/2021 15:58:02.

TRUTE 2008

Trute: Einfluss der Prozesskette auf die Feinkornbeständigkeit von mikrolegierten Einsatzstählen. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2008).

UCHARZEWSKI 2010

Ucharzewski, A.: Massivumformung - eine Prozesskette für den Leichtbau. Lightweight Design 3 (2010) 2, S. 42-49.

ULRICH & HILL 1979

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Wirtschaftswissenschaftliches Studium : Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt (1979) 5 (7+8), S. 304-309.

VDI 2221-11 2019

VDI 2221-11: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren Technischer Systeme und Produkte (2019).

VDI 2225 BLATT 3 2016

VDI 2225 Blatt 3: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung (2016).

VDI 3405 2014

VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren. Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibung (2014).

VDI 3405 BLATT 2 2014

VDI 3405 Blatt 2: Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung (2014).

VOCK ET AL. 2019

Vock, S.; Klöden, B.; Kirchner, A.; Weißgärber, T.; Kieback, B.: Powders for powder bed fusion: a review. Progress in Additive Manufacturing 4 (2019) 4, S. 383-397.

VOGEL 1984

Vogel, W.: Verbesserung der Dauerhaltbarkeit von Bauteilen durch die thermochemischen Verfahren Einsatzhärten, Nitrieren und Borieren. VDI-Bericht Nr. 506. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 1984.

VOGT 2015

Vogt, M.: Bestandsaufnahme Leichtbau in Deutschland. VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2015).

VRANCKEN ET AL. 2018

Vrancken, B.; King, W. E.; Matthews, M. J.: In-situ characterization of tungsten microcracking in Selective Laser Melting. *Procedia CIRP* 74 (2018) 4, S. 107-110.

WANG & KELLY 2016

Wang, W.; Kelly, S.: A Metallurgical Evaluation of the Powder-Bed Laser Additive Manufactured 4140 Steel Material. *JOM* 68 (2016) 3, S. 869-875.

WAWERS 2020

Wawers, W.: *Bionik. Bionisches Konstruieren verstehen und anwenden*. 1st ed. 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Vieweg 2020. ISBN: 9783658318734.

WEI ET AL. 2018

Wei, L. C.; Ehrlich, L. E.; Powell-Palm, M. J.; Montgomery, C.; Beuth, J.; Malen, J. A.: Thermal conductivity of metal powders for powder bed additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 21 (2018) 2, S. 201-208.

WICKE 1976

Wicke, D.: *Das Festigkeitsverhalten von legierten Einsatzstaehlen bei Schlagbeanspruchung*. Dissertation Technische Universität Berlin (1976).

WIEGAND & TOLASCH 1967

Wiegand, H.; Tolasch, G.: *Dauerfestigkeitsverhalten einsatzgehärteter Proben*. Härtereitechnische Mitteilung (1967).

WINKLER ET AL. 2022

Winkler, J.; Schmitt, M.; Tobie, T.; Schlick, G.; Stahl, K.; Daub, R.: Characterization and Influences of the Load Carrying Capacity of Lightweight Hub Designs of 3D-printed gears (16MnCr5, PBF-LB/M-process). *Proceeding* (2022).

WITELSKI & BOWEN 2015

Witelski, T.; Bowen, M.: *Methods of Mathematical Modelling. Continuous Systems and Differential Equations*. 1st ed. 2015. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer 2015. ISBN: 978-3-319-23042-9. (Springer Undergraduate Mathematics Series).

WITTEL ET AL. 2017

Wittel, H.; Jannasch, D.; Voßiek, J.; Spura, C.: *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung*. 23., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017. ISBN: 9783658178963.



WOHLERS 2021

Wohlers: Wohlers Report 2021. 3D Printing and Additive Manufacturing, Global State of the Industry (2021).

WORLD ECONOMIC FORUM 2022

World Economic Forum: An Additive Manufacturing Breakthrough. A How-to Guide for Scaling and Overcoming Key Challenges (2022), S. 1-22.

WU ET AL. 2015

Wu, W.; Tor, S. B.; Chua, C. K.; Leong, K. F.; Merchant, A.: Investigation on processing of ASTM A131 Eh36 high tensile strength steel using selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping* 10 (2015) 4, S. 187-193.

WURM 2020

Wurm, T.: Hochfeste Stähle, mit hoher Energie-Effizienz – GMH Gruppe.  
<<https://www.gmh-gruppe.de/de-de/technologien/hochfeste-staehle-mit-hoher-energie-effizienz.html>> - 03/08/2021 13:49:53.

XIANG ET AL. 2018

Xiang, Z.; Yin, M.; Dong, G.; Mei, X.; Yin, G.: Modeling of the thermal physical process and study on the reliability of linear energy density for selective laser melting. *Results in Physics* 9 (2018) 3, S. 939-946.

XIAOCHUAN ET AL. 2004

Xiaochuan, C.; Jianguo, Y.; Beizhi, L.; Xin-an, F.: Methodology and technology of design for cost (DFC). *World Congress on Intelligent Control and Automation* (2004), S. 2834-2840.

XU & DAI 2021

Xu, G.; Dai, N.: Michell truss design for lightweight gear bodies. *Mathematical Biosciences and Engineering* 18 (2021) 2, S. 1653-1669.

YADOLLAHI & SHAMSAEI 2017

Yadollahi, A.; Shamsaei, N.: Additive manufacturing of fatigue resistant materials. Challenges and opportunities. *International Journal of Fatigue* 98 (2017), S. 14-31.

YADROITSEV ET AL. 2007

Yadroitsev, I.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science* 253 (2007) 19, S. 8064-8069.

YADROITSEV ET AL. 2021

Yadroitsev, I.; Yadroitsava, I.; Du Plessis, A.; MacDonal, E.: *Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*. Amsterdam Netherlands, Cambridge MA: Elsevier 2021. ISBN: 978-0-12-824090-8.

YADROITSEV & SMUROV 2010

Yadroitsev, I.; Smurov, I.: Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia* 5 (2010), S. 551-560.

YAN ET AL. 2014

Yan, C.; Hao, L.; Hussein, A.; Young, P.; Raymont, D.: Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials & Design* 55 (2014), S. 533-541.

YANG & EVANS 2007

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

YEUNG ET AL. 2019

Yeung, H.; Lane, B.; Fox, J.: Part geometry and conduction-based laser power control for powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 30 (2019).

ZHANG ET AL. 2019

Zhang, C.; Chen, F.; Huang, Z.; Jia, M.; Chen, G.; Ye, Y.; Lin, Y.; Liu, W.; Chen, Bingqing; Shen, Qiang; Zhang, Lianmeng; Lavernia, Enrique J.: Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Materials Science and Engineering: A* 764 (2019) 3, S. 138209.

ZHAO ET AL. 2015

Zhao, X.; Song, B.; Zhang, Y.; Zhu, X.; Wei, Q.; Shi, Y.: Decarburization of stainless steel during selective laser melting and its influence on Young's modulus, hardness and tensile strength. *Materials Science and Engineering: A* 647 (2015), S. 58-61.

ZIEBURA & MEINERS 2016

Ziebura, D.; Meiners, W.: Verarbeitung von Einsatz- und Vergütungsstählen mittels SLM. 2016.

ZOCH 2009

Zoch, H.-W.: Distortion engineering: vision or ready to application? *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 40 (2009) 5-6, S. 342-348.

ZONGO ET AL. 2018

Zongo, F.; Tahan, A.; Aidibe, A.; Brailovski, V.: Intra- and Inter-Repeatability of Profile Deviations of an AlSi10Mg Tooling Component Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2 (2018).

ZUMOFEN ET AL. 2017

Zumofen, L.; Beck, C.; Kirchheim, A.; Dennig, H.-J.: Quality Related Effects of the Preheating Temperature on Laser Melted High Carbon Content Steels. In: Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA 2017 (2017), S. 210-219.

ZUMOFEN ET AL. 2020

Zumofen, L.; Kirchheim, A.; Dennig, H.-J.: Laser powder bed fusion of 30CrNiMo8 steel for quenching and tempering: examination of the processability and mechanical properties. Progress in Additive Manufacturing 5 (2020), S. 75-81.

ZUO ET AL. 2019

Zuo, P.; Chen, S.; Wei, M.; Zhou, L.; Liang, J.; Liu, C.; Wang, M.: Microstructure evolution of 24CrNiMoY alloy steel parts by high power selective laser melting. Journal of Manufacturing Processes 44 (2019), S. 28-37.

## 12 Anhang

Tabelle 20: Übersicht an verarbeiteten Kohlenstoffhaltigen Stählen von 0,12-2,1 Ma.-% Kohlenstoff

Werkstoff	Kohlenstoffgehalt	Energiedichte	Vorheizung	Schutzgas	Erzielte Dichte	Quelle
-	Ma.-%	J/mm <sup>3</sup>	°C	-	%	-
M50NiL	0,12	146,02	-	Argon	99,9	SCHEITLER ET AL. 2016
M50NiL	0,12	-	-	Argon	99,91	BEER ET AL. 2018
18MnNiSi	0,15	91,15	100	-	97	WU ET AL. 2015
16MnCr5	0,16	105,82	80	Argon	>99,5	KAMPS 2018
16MnCr5	0,16	86,58	80	Argon	>99,5	SCHMITT ET AL. 2018
16MnCr5	0,16	105,82	80	Argon	>99,5	SCHMITT ET AL. 2020B
16MnCr5	0,16	73,52	150	Argon	99,90	BARTELS ET AL. 2020
20MnCr5	0,17	94,29	80	Argon	99,67	SCHMITT ET AL. 2021C
HY100	0,18	65,00	-	Stickstoff	99,7	DILIP ET AL. 2017
E185AMP O	0,2	64,93	20	-	99,98	AUMAYR ET AL. 2020
21NiCrMo 2	0,20	150,0	20	Argon	99,80	HEARN 2021

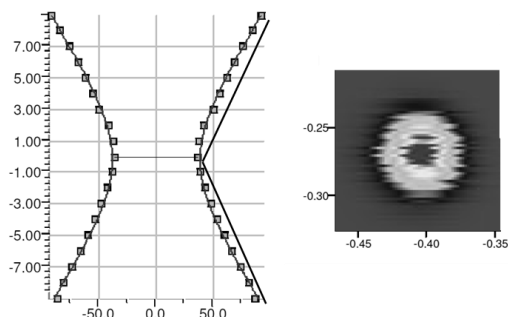
## Anhang

Werkstoff	Kohlenstoffgehalt	Energiedichte	Vorheizung	Schutzgas	Erzielte Dichte	Quelle
-	Ma.-%	J/mm <sup>3</sup>	°C	-	%	-
24CrNiMoY	0,2	1,6	20	Argon	98	ZUO ET AL. 2019
20MnCr5	0,22	-	-	-	99,95	KLUGE ET AL. 2017
24CrNiMo	0,24	-	-	-	99,14	TANG ET AL. 2020
X22CrMoV1-2-1	0,24	-	-	-	99,90	ROSSWAG GMBH 2019
USS Steel	0,276	-	-	-	99,35	KUDZAL ET AL. 2020
X30Mn22	0,29	105,08	-	Argon	99,9	HAASE ET AL. 2017
25CrMo4	0,305	72,73	160	Stickstoff	>99,5	LI ET AL. 2019
30CrNiMo8	0,3	82,53	300	Argon	99,76	ZUMOFEN ET AL. 2020
S33C	0,33	800	20	Stickstoff	-	NAKAMOTO ET AL. 2009
25CrMo4	0,34	140	20	Argon	99,80	HEARN 2021
X40CrMoV5-1	0,35	67,46	400	-	>99	MERTENS ET AL. 2016
X40Cr13	0,38	79,54	-	-	-	ZHAO ET AL. 2015
36CrNiMo4	0,39	141,67	80	Stickstoff	-	JELIS ET AL. 2015

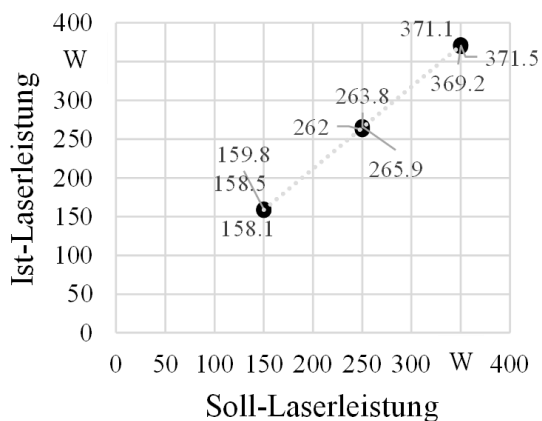
Werkstoff	Kohlenstoffgehalt	Energiedichte	Vorheizung	Schutzgas	Erzielte Dichte	Quelle
-	Ma.-%	J/mm <sup>3</sup>	°C	-	%	-
42CroMo4	0,39	84,87	200	Argon	99,80	DAMON ET AL. 2019
X40Cr13	0,4	-	-	Stickstoff	-	KRAKHMALOV ET AL. 2015
36CrNiMo4	0,43	140,00	20	Argon	99,80	HEARN 2021
42CroMo4	0,44	88,06	80	Argon	99,80	WANG & KELLY 2016
45CrNi4Mo	0,45	172,22	25	Argon	98	CHEN ET AL. 2017
42CrMo4	0,47	160,00	20	Argon	99,80	HEARN 2021
S50C	0,49	800	20	Stickstoff	-	NAKAMOTO ET AL. 2009
X65MoCrWV3-2	0,6	-	300	Argon	>99,5	BOES ET AL. 2018
Fe90,8Cr4V0,5W4C	0,68	88,38	25	Argon	>99,5	SANDER 2018
S75C	0,76	200	20	Stickstoff	-	NAKAMOTO ET AL. 2009
M2 HSS	0,83	83,33	400	Argon	99,0	ZUMOFEN ET AL. 2017
80MoCrV4216	0,83	69,89	200	Argon	99,9	KUNZ ET AL. 2020
80MoCrV4216	0,84	90,28	500	Argon	99,8	KUNZ ET AL. 2018

## Anhang

Werkstoff	Kohlenstoffgehalt	Energiedichte	Vorheizung	Schutzgas	Erzielte Dichte	Quelle
-	Ma.-%	J/mm <sup>3</sup>	°C	-	%	-
M2 HSS	0,9	182,29	200	-	99,8	KEMPEN ET AL. 2014
S105C	1,04	200	20	Stickstoff	-	NAKAMOTO ET AL. 2009
X110CrMoVA18-2	1,04	95,24	240	-	-	FEUERHAHN ET AL. 2013
M3:2 HSS	1,29	218,62	300	Argon	-	GEENEN ET AL. 2019
USS Carbon Steel	2,1	-	-	Stickstoff	92,0	TAHA ET AL. 2012



Beam diameter: 73,61  $\mu\text{m}$   
 Beam diameter X: 74,94  $\mu\text{m}$   
 Beam diameter Y: 72,25  $\mu\text{m}$   
 Beam position X: -0,41 mm  
 Beam position Y: -0,27 mm



Trendlinie:  $y = m * x + c$ ;  $m = 1,059$ ;  $c = -0,317$

Abbildung 93: Strahlcharakteristik und Laserleistung der EOS M290 Anlage

Tabelle 21: Verwendete Prüf- und Untersuchungsmethoden

Untersuchungs- methode	Prüfgerät	Zielgröße	Norm/Be- merkung	Genauig- keit
Härteprüfung	Zwick Roell ZHU 2.5	Härte Vickers	DIN EN ISO 6507-1	± 0,1 %
Nanoidentation	Zwick Roell ZHN	Härte Vickers (umgewertet)	Extern an Technischer Hochschule Ingolstadt	± 0,1 %
Zugprüfung	Zwick Roell Z050	Zugfestigkeit Streckgrenze Dehngrenze	DIN EN ISO 6892-1	± 0,1 %
Druckprüfung	Zwick Roell Z050	Druckfestig- keit	DIN EN ISO 50106	± 0,1 %
Biegeprüfung	Zwick Roell Z050	Biegefestig- keit	DIN EN ISO 7438	± 0,1 %
Kerbschlagbiege- prüfung	Pendelschlag- werk 300 J	Kerbschlagar- beit	DIN EN ISO 148	± 1 %
Drehmomentprü- fung	Drehmoment- schlüssel	Max. Schubspan- nung	DIN EN ISO 6789-1	± 4 %
Zahnrad Pulsator- prüfung	FZG Ser- vohydrauli- scher Pulsator	Zahnfußfes- tigkeit	-	± 3,5 %
Zahnrad Laufver- such	FZG hydrau- lischer Ver- spannprüf- stand	Lauffähigkeit und Grüb- chentragfä- higkeit	-	± 3,5 %
Dichtebestim- mung (optisch)	Keyence VK 9700	Relative Dichte in der	DIN EN ISO 3369	± 2 %



## Anhang

	Olympus BX53M	jeweiligen Schicht		
Dichtebestimmung (archimedisch)	Kern Präzisionswaage	Relative Dichte über das Gesamtbauerteile	DIN EN ISO 1183-1	± 4 %
Rauigkeitsmessung	Keyence VK 9700	Sa, Sz, Ra, Rz	EN ISO 25178	± 5 %
Partikelgrößenbestimmung	Mastersizer 3000	Partikelgröße und Partikelverteilung	-	± 5 %
Fließfähigkeit	Rheometer FT4	Basic Flowability Energy	DIN 53019	± 5 %
Trägerheißgasextraktion (ONH)	Bruker Galileo G8	Sauerstoff- und Stickstoffgehalt	Kalibrierung mit Referenzprobe AR670	3,5 Ma.-% abs.
Trägerheißgasextraktion (CS)	Leco CS-200	Kohlenstoffgehalt	Externe Messung	3,5 Ma.-% abs.
Funkenspektroanalyse	SpectroLab M10	Chemische Zusammensetzung	Externe Messung	3 Ma.-% abs
Lichtmikroskopische Betrachtung	Olympus BX53M	Gefüge	-	-
Rasterelektronenmikroskopie	TM3030plus Tabletop Microscope Hitachi	Bruchflächen	-	-
Vermessung	Mitutoyo Digimatic 500	Maßhaltigkeit	-	± 20 µm
Optische Vermessung	GOM ATOS Core	Maßhaltigkeit	-	± 10 µm

**Anforderungs-Checkliste**

**Produktanforderungen:**

Min. Bauteildichte:	_____	Max. Randoxidation:	_____
Max. Aufmaß:	_____	Max. Oberflächenrauheit:	_____
Min. Oberflächenhärte:	_____	Einsatzhärtetiefe:	_____
Min. Zugfestigkeit:	_____	Min. Wechselfestigkeit:	_____
Restaustenitanteil:	_____	Chem. Zusammensetzung:	_____
Zul. Eigenspannungen:	_____		

**Prozessanforderungen:**

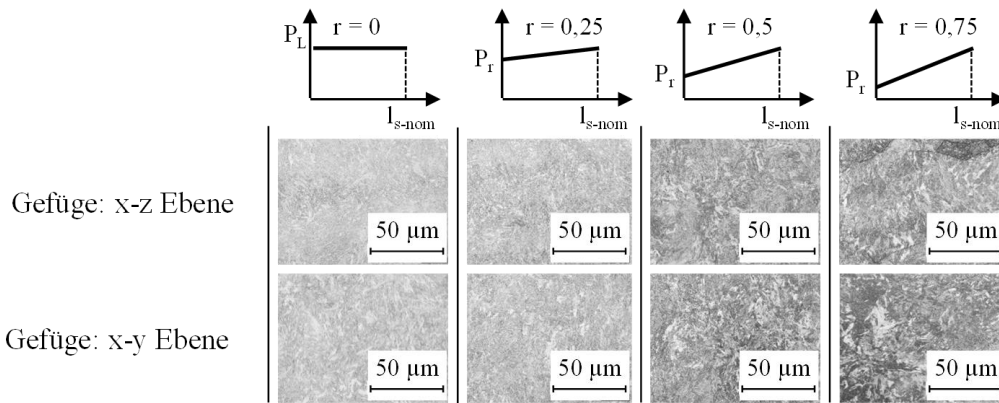
Max. Laserleistung:	_____	Max. Scangeschwindigkeit:	_____
Zul. Belichtungsstrategien:	_____	Zul. Schutzgas:	_____
Max. Bauplattformtemperatur:	_____	Max. Bauteilgröße:	_____

**Unternehmensanforderungen:**

Verfügbare Zeit:	_____	Statistische Sicherheit:	_____
Angestrebte Kosten:	_____	Zul. Pulverrecycling:	_____

max.: maximal; min.: minimal; zul.: zulässig;

*Abbildung 94: Anforderungscheckliste zur Eingrenzung der Einflussfaktoren*



z-Richtung: Aufbaurichtung

$d_f$ : Fokussdurchmesser;  $d_s$ : Querschnitt der Struktur;  $l_{s-nom}$ : nominelle Scanvektorlänge der Belichtungsstrategie

Abbildung 95: Entwicklung von Parametersätzen für Strukturen mittleren Querschnitts

Tabelle 22: Korrelationsmatrix von Schubspannung bei Bruch und Fertigungsparametern von Supportstrukturen; dargestellt ist der Korrelationskoeffizient  $r$ .  $r$  besitzt keine Einheit.

$r$	$\tau$	$P_L$	$v_s$	$E_v$	$H$
$\tau$	1	0,7	-0,4	0,9	-0,4
$P_L$	0,7	1	0	0,7	0
$v_s$	-0,4	0	1	-0,26	0
$E_v$	0,9	0,7	-0,26	1	-0,6
$H$	-0,4	0	0	-0,6	1

*Tabelle 23: Korrelationsmatrix von Zugspannung bei Bruch und Fertigungsparametern von Supportstrukturen; dargestellt ist der Korrelationskoeffizient  $r$ .  $r$  besitzt keine Einheit.*

$r$	$\sigma$	$\tau$	$P_L$	$v_s$	$E_v$	$H$
$\sigma$	1	0,7	0,2	-0,49	0,65	-0,6
$\tau$	0,7	1	0,7	-0,4	0,9	-0,4
$P_L$	0,2	0,7	1	0	0,64	0
$v_s$	-0,49	-0,4	0	1	-0,38	0
$E_v$	0,65	0,9	0,64	-0,38	1	-0,6
$H$	-0,6	-0,4	0	0	-0,6	1

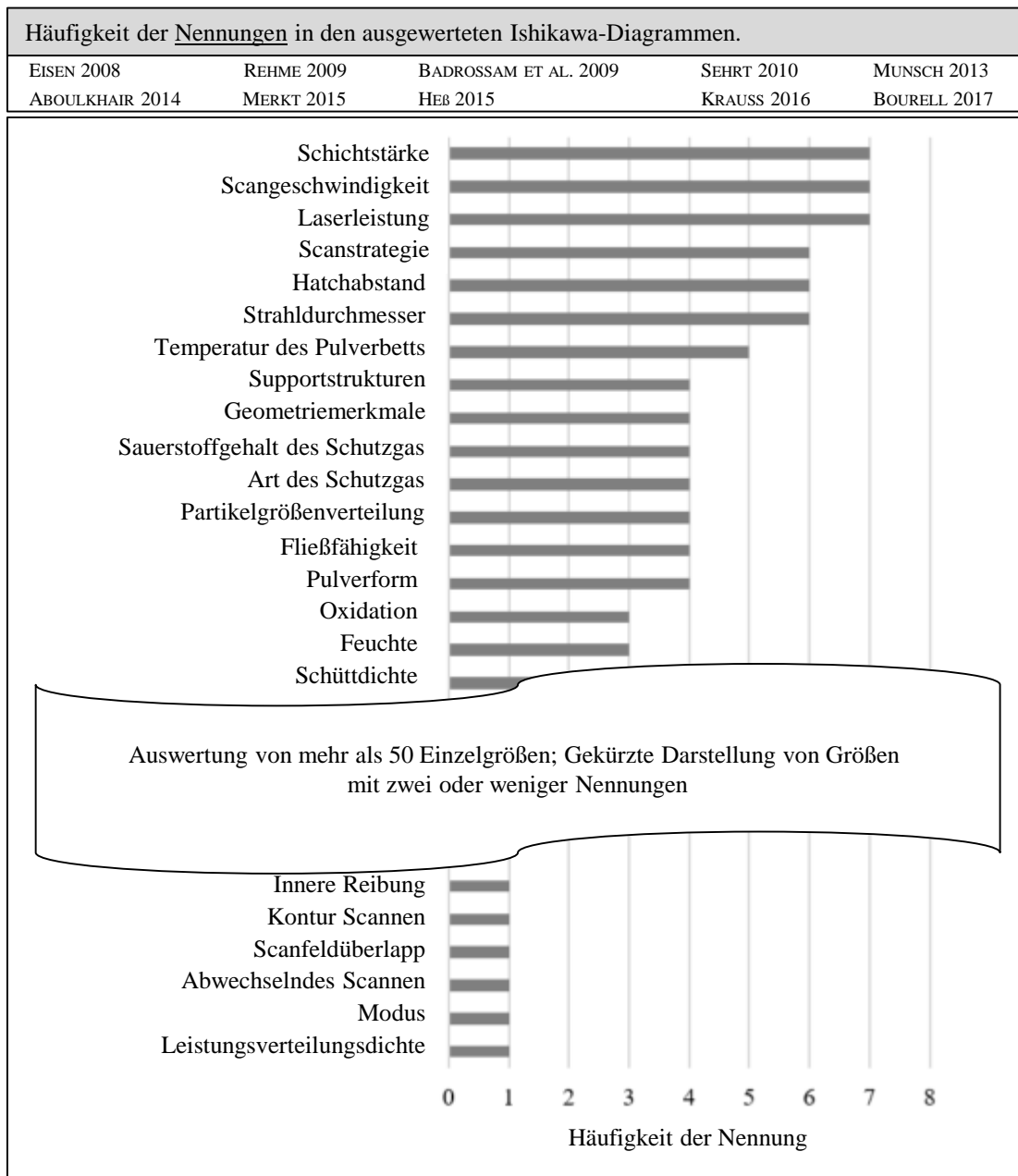


Abbildung 96: Quantitative Auswertung der Einflussgrößen im Laser-Strahlschmelzen

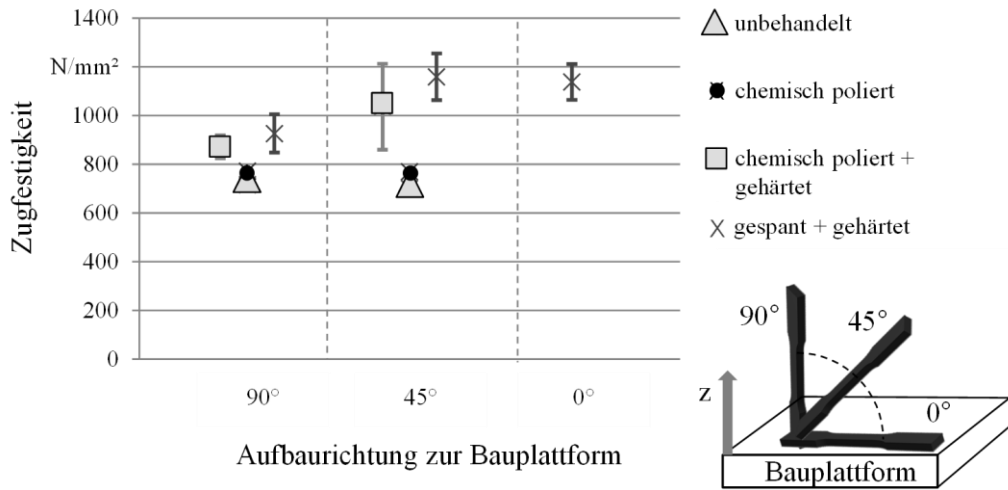


Abbildung 97: Übersicht des Zugversuchs nach BERNER 2021

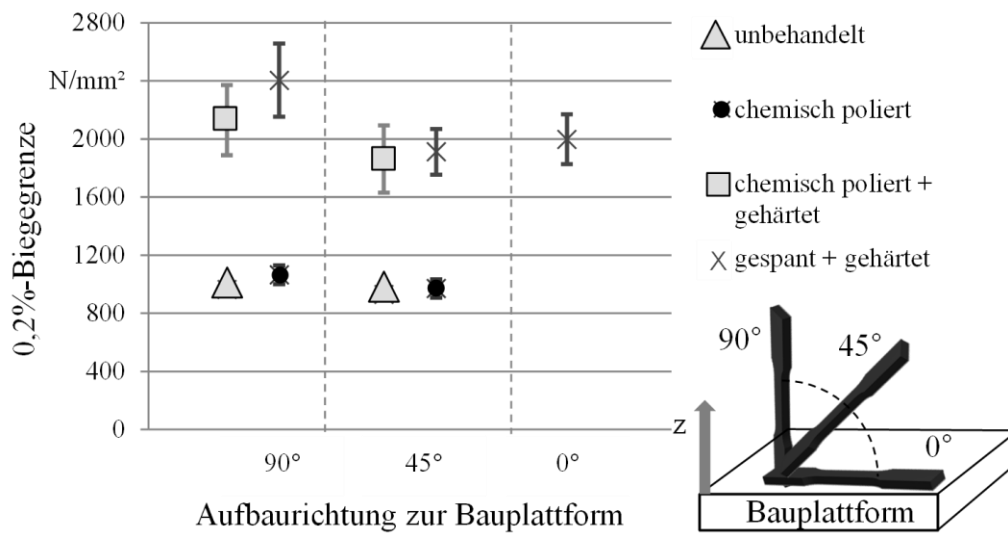


Abbildung 98: Übersicht des Biegeversuchs nach BERNER 2021

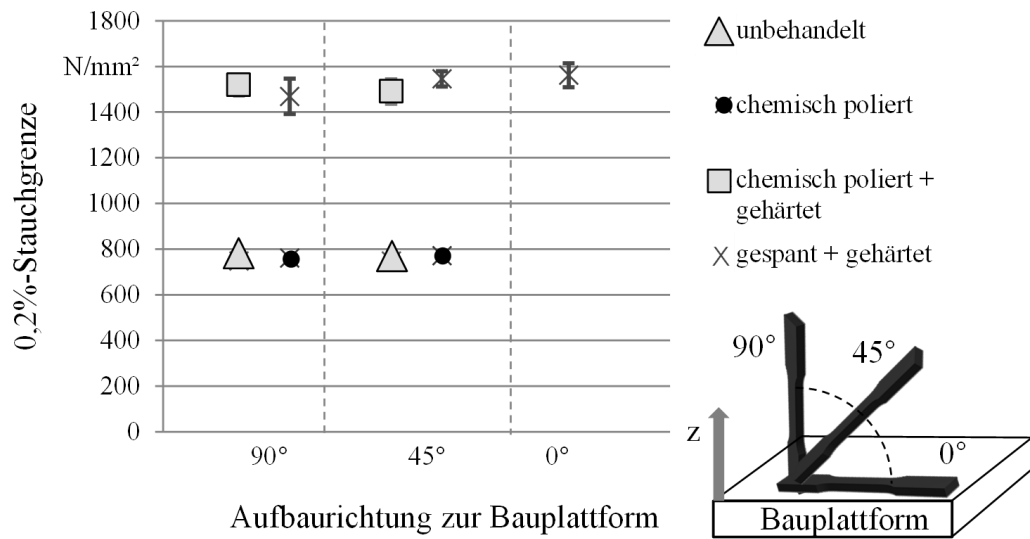


Abbildung 99: Übersicht des Druckversuchs nach BERNER 2021

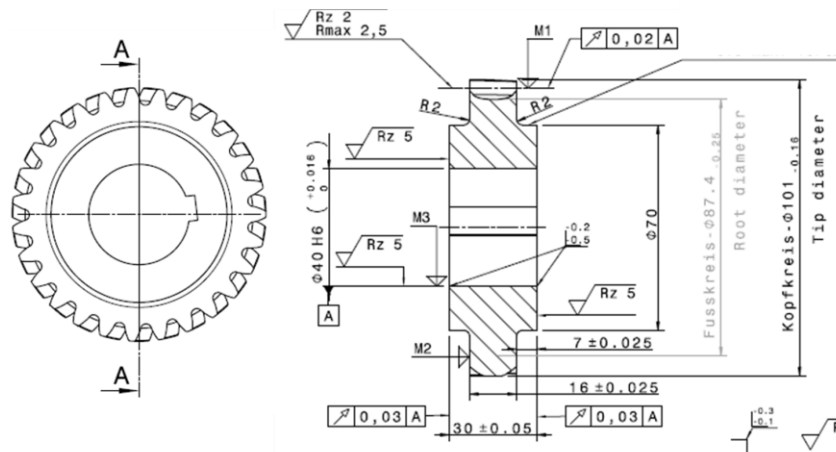
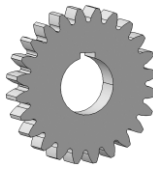




Abbildung 100: Zeichnung des Typ-1 Rads mit Kenngrößen der Verzahnung

Tabelle 24: Verzahnungsdaten und Eigenschaften der Prüfverzahnungen

Beschreibung	Symbol	Einheit	Pulsatorrad	Typ-1	Typ 17/18
Abbildung					
Modul	$m_n$	mm	5	3,3	5,0
Zähnezahl	$z$	-	24	25/27	17/18
Breite	$b$	mm	20	14/16	14/14
Eingriffswinkel	$\alpha$	°	20,0	19,0	20,0
Schrägungswinkel	$\beta$	°	0	18,0	0
Einsatzhärtungstiefe	$\text{CHD}_{550\text{HV}1}$	mm	Zahnfuß: $1,00 \pm 0,03$	Zahnflanke: $0,91 \pm 0,07$	Zahnflanke: $0,71 \pm 0,05$
Rauheit Zahnflanke	$R_a$	$\mu\text{m}$	ungeschliffen	$0,44 \pm 0,04$	$0,45 \pm 0,02$
Nabenvarianten	-	-	Vollnabe/1 x Leichtbaunabe	Vollnabe/3 x Leichtbaunabe	-
Strahlbehandlung	-	-	Reinigungsstrahlen	Reinigungsstrahlen	Reinigungsstrahlen



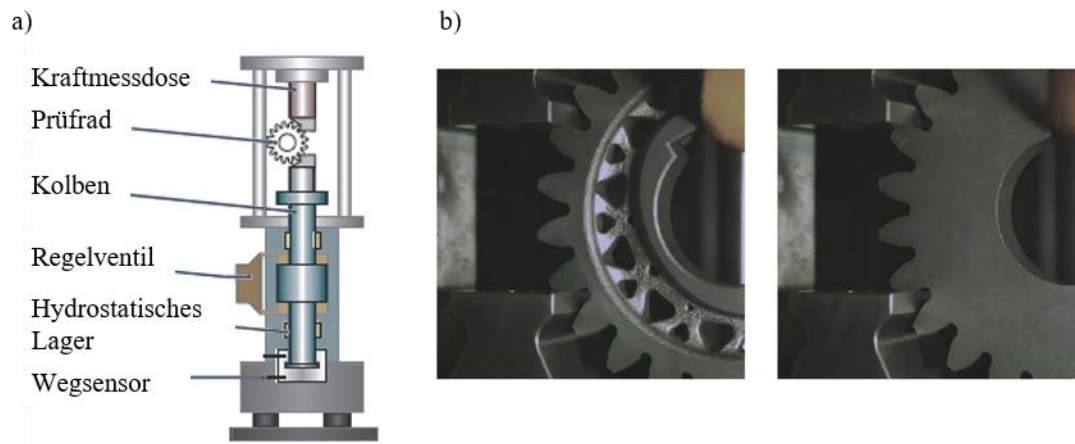


Abbildung 101: a) Schematischer Aufbau des Pulsatorprüfstands b) Eingespannte Verzahnungen

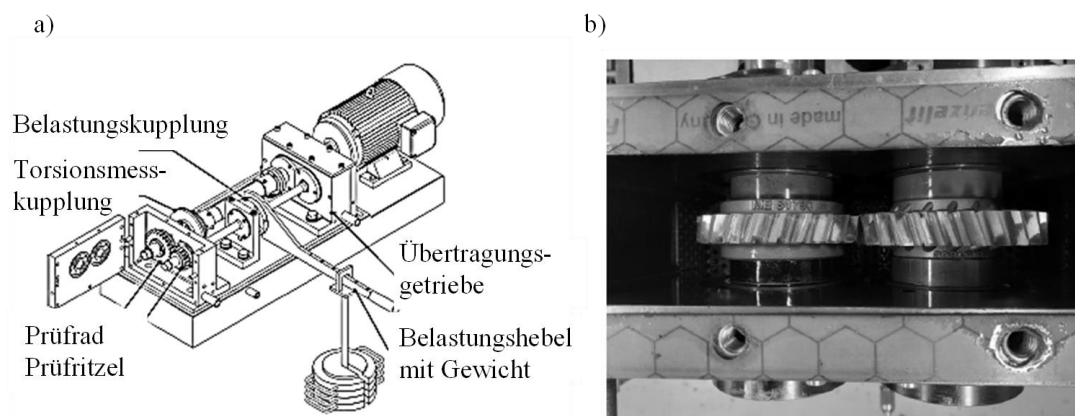


Abbildung 102: a) Schematischer Aufbau des Zahnradverspannprüfstands b) Eingespannte Verzahnungen

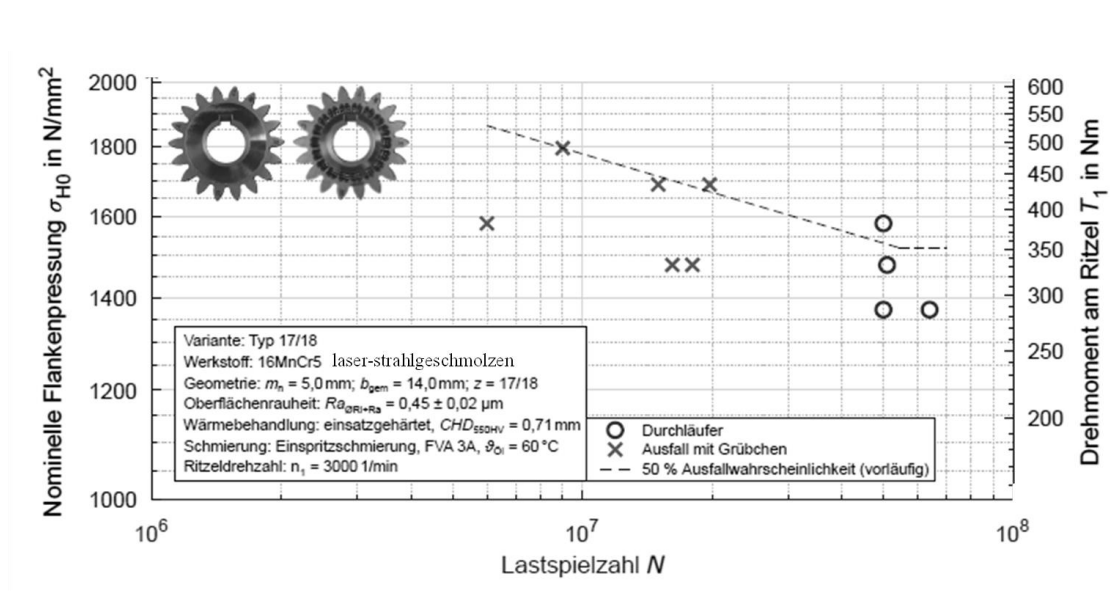


Abbildung 103: Ergebnis der Laufversuche auf Grübchentragfähigkeit der 17/18-Geradverzahnung; Einsatzhärtetiefe von 0,71 mm auf Grund der kleineren Bauform der Typ 17/18 Geradverzahnung

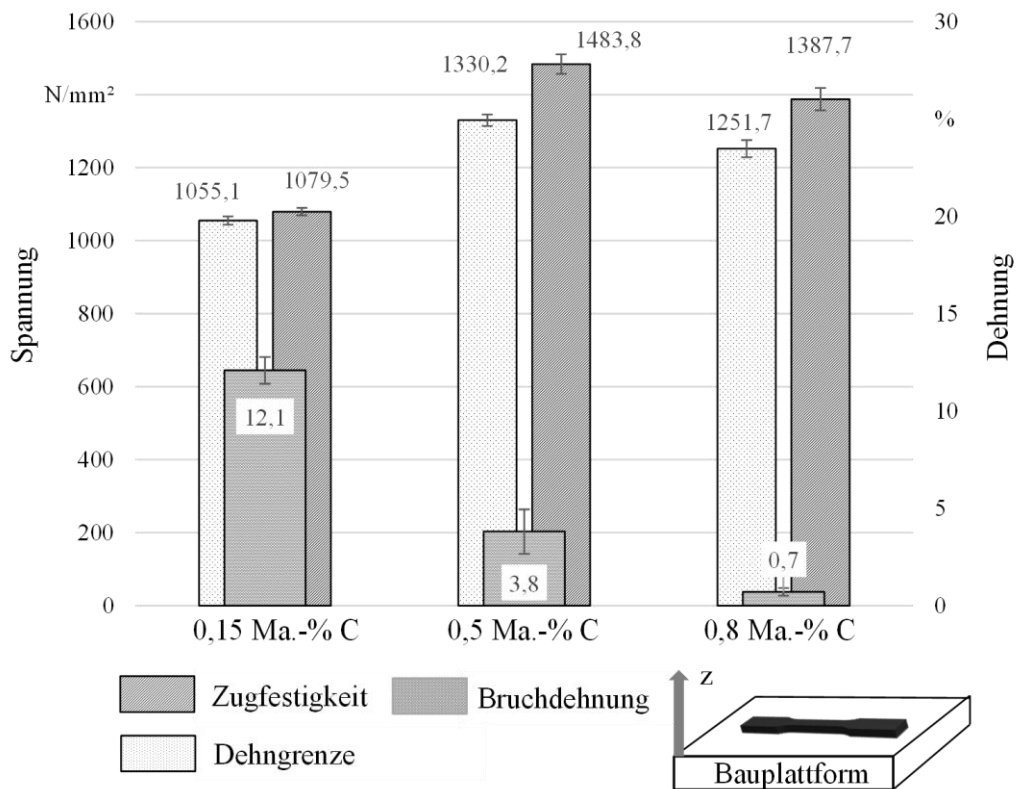


Abbildung 104: Festigkeit im statischen Zugversuch bei gesteigertem Kohlenstoffgehalt durch In-situ-Legieren nach einem Härteprozess; Flachzugproben, liegend aufgebaut;  $n = 5$



## 13 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) und an dem Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite-, und Verarbeitungstechnik IGCV in den Jahren 2017 bis 2022 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Fertigung von Einsatzstähle, des Einsatzhärtens und der Herstellung von Zahnrädern untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für Ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

*Tabelle 25: Liste der im Rahmen dieser Arbeit betreuten studentischen Arbeiten mit Autor und Titel*

<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Typ</b>	<b>Jahr</b>
BERNER, O.	Untersuchung von Einflussparametern auf die statische und dynamische Festigkeit in der Additiven Fertigung - Laserstrahlschmelzen	MA	2021
BIHLMER, A.	Topologieoptimierter Formleichtbau durch den Einsatz additiver Fertigung bei der Zahnradherstellung	BA	2018
BIRKHOLZ, J.	Untersuchung von Einflussparametern auf Werkstoffeigenschaften und Reproduzierbarkeit in der Prozesskette des Laser-Strahlschmelzens	BA	2021
BÖSELE, M.	Untersuchung von Einflussparametern auf Werkstoffeigenschaften in der Prozesskette des Laser-Strahlschmelzens	BA	2020
BRUMMER, M.	Experimentelle Untersuchung zur Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeit von additiv gefertigten Zahnrädern mittels Laser-Strahlschmelzen (LPBF) von 16MnCr5	MA	2021
FIEBER, R.	Betrachtung des Verzugverhaltens von leichtbauoptimierten, additiv gefertigten Bauteilen bei einer Wärmebehandlung	BA	2020
GANNER, P.	Materialqualifizierung eines Einsatzstahls und Konstruktion einer Leichtbauoptimierten Verzahnung	BA	2019
GERSTL, F.	Einfluss der Belichtungsparameter und der Geometrie auf den Werkstoffzustand anhand des Werkstoffs 16MnCr5 in der additiven Fertigung	BA	2021
GRAF, M.	Materialqualifizierung des Einsatzstahls 16MnCr5 entlang der Prozesskette in der additiven Fertigung	DA	2017
GOTTWALT, A.	Maßnahmen zur In-Situ-Beeinflussung von Gefügeeigenschaften des Einsatzstahls 16MnCr5 beim Laserstrahlschmelzen	MA	2019
HILFER, M.	Untersuchungen der Härbarkeit bei additiv gefertigten Bauteilen aus 16MnCr5	BA	2019
INAYATHULLA, S.	Influence of heat treatment on the mechanical properties and the microstructure of additively manufactured 16MnCr5 lightweight structures	MA	2019
JANSEN, D.	Bionischer Leichtbau in der Zahnradherstellung durch Einsatz additiver Fertigung	BA	2018
KEMPTER, B.	Anforderungsgerechte Auslegung von Stützstrukturen für additiv gefertigte Bauteile aus Einsatzstahl (16MnCr5)	MA	2020
KLEMENS, P.	Leichtbau und Funktionsintegration einer ausgewählten Getriebekomponente mittels additiver Fertigung	MA	2020
KUHLMANN, N.	Leichtbau einer Getriebeverzahnung mittels Einsatz von Topologieoptimierung und Gitterstrukturen für die Additive Fertigung	BA	2018
MACHNIK, A.	Functional Integration of Heat Pipe Wick Structures by Laser Beam Melting - Method Development and Experimental Investigation	MA	2018
SCHINDLER, V.	Gitterstrukturen nach biologischen Vorbildern in der technischen Anwendung	BA	2019

## Studienarbeiten

---

TAUSENDPFUND, T.	Erfolgskritische Faktoren bei der Implementierung von „Design-for-Additive Manufacturing“ im Unternehmen	MA	2018
ZIMBROD, P.	Ganzheitliche Produktoptimierung durch kraftflussgerechte Strukturen und additive Fertigungstechnologien am Beispiel eines Sportfahrrads	MA	2019

BA: Bachelorarbeit MA: Masterarbeit DA: Diplomarbeit