

Montanuniversität Leoben

Department Product Engineering

Lehrstuhl für Umformtechnik



Dissertation

Potentiale und Restriktionen von Gitterstrukturen für die additive Fertigung

Eingereicht von:

Dipl.-Ing. Alexander Walzl

Juli 2018

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der montanistischen Wissenschaften

Betreuer:

Buchmayr Bruno, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont.

Lehrstuhl für Umformtechnik

Montanuniversität Leoben

Dipl.-Ing. Walzl Alexander Maximilian

Potentiale und Restriktionen von Gitterstrukturen für die additive Fertigung

Dr.-Studium der montanistischen Wissenschaften, Umformtechnik

Montanuniversität Leoben

Bearbeitungszeitraum: 1. Mai 2015 – 3. Juli 2018

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, 3.7.2018

Dipl.-Ing. Alexander Walzl

Danksagung

An dieser Stelle darf ich mich für die Ermöglichung dieser Arbeit am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben und für die wohlwollende Förderung und wissenschaftliche Unterstützung bei meinem Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr sehr herzlich bedanken. Weiters möchte ich Frau Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Clara Schuecker vom Lehrstuhl für Konstruieren in Kunst- und Verbundwerkstoffen von der Montanuniversität Leoben für die fachliche Unterstützung bei der Verfassung dieser Arbeit danken. Zusätzlich gilt mein besonderer Dank der Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Ermöglichung der wissenschaftlichen und finanziellen Rahmenbedingungen die für die Durchführung dieser Arbeit notwendig waren.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Umformtechnik danke ich für die herzliche Einbindung und für die äußerst gute Zusammenarbeit. Im Speziellen gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Panzl, der mich während der Dauer des Projektes mit wertvollen wissenschaftlichen Diskussionen unterstützte. Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, Gerald und Silvia Walzl die mich während der Gesamtdauer der akademischen und persönlichen Laufbahn jederzeit unterstützten.

Für die schönen Zeiten in der Montanstadt Leoben sowie für die Unterstützung auch in schwierigen Lebenslagen möchte ich mich bei meiner Frau, Isabella Walzl und meinen Freunden bedanken.

Abkürzungsverzeichnis

FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FEO	Finite Elemente Optimierung
FEA	Finite Elemente Analyse
AM	Additive Manufacturing
L-PBF	Laser – Powder Bed Fusion
EB-PBF	Electron Beam – Powder Bed Fusion
MHV	Multimaterial Hybrid Verbindung
F-WLG	Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung
WBH	Wärmebehandlung
ND:YAG Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
HPDC	High Pressure Die Casting
IM	Injection Moulding
DAS	Dendritenarmabstand
α -MK	Aluminium-Mischkristall
HB	Härte Brinell
GP(I)	Guinier-Preston I Phase
GP(II)	Guinier-Preston II Phase
β	Mg ₂ Si Ausscheidung - plattenförmig
β'	Mg ₂ Si Ausscheidung – stäbchenförmig
β''	Mg ₂ Si Ausscheidung – nadelförmig

Formelzeichen

ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[g/cm ³]	Dichte
z	[μm]	Schichtstärke
c_p	[J/kgK]	spezifische Wärmekapazität
t	[s]	Zeit
v^e	[m/s]	Erstarrungsgeschwindigkeit
G	[K/m]	Temperaturgradient
E^l	[J/m]	Streckenenergie
P	[W]	Laserleistung
v	[m/s]	Scangeschwindigkeit
E^v	[J/m ³]	Volumenenergie
h	[μm]	Hatchabstand
ξ	[$\sqrt{\text{MPa}} \text{ cm}^3/\text{g}$]	Materialeffizienz
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
n	[-]	Belastungsparameter
R_{ZD}	[MPa cm ³ /g]	Materialeffizienz für die maximal zulässige Spannung
C_{ZD}	[MPa $\sqrt{\text{m}}$ cm ³ /g]	Materialeffizienz für Versagen
ρ^*	[-]	relative Dichte
ϕ	[-]	Formfaktor
L_{T}	[10 ⁻³ kg ^o /Nm ³]	Leichtbaugüte für Torsion
m_{BT}	[kg]	Bauteilmasse
c_{T}	[Nm ²]	Torsionssteifigkeit
G	[MPa]	Schubmodul
J_{T}	[m ⁴]	polares Trägheitsmoment
l_{T}	[m]	axiale Länge für Torsion
E_0	[MPa]	Ausgangs-Elastizitätsmodul
p	[-]	Reduktionsfaktor

m_z	[Anz.]	durchschnittliche Kantenanzahl der Nachbarzellen
a_{2D}	[-]	statistische Konstante für 2D
b_{2D}	[-]	statistische Konstante für 2D
n_z	[Anz.]	Kantenanzahl pro Zelle
n_f	[Anz.]	Flächenanzahl pro Zelle
m_f	[Anz.]	durchschnittliche Flächenanzahl der Nachbarzellen
a_{3D}	[-]	statistische Konstante für 3D
b_{3D}	[-]	statistische Konstante für 3D
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	Streckgrenze
A_{50mm}	[%]	Bruchdehnung
$f_{(t)}$	[%]	zeitabhängiger gebildeter Phasenanteil
k	[-]	Avramiexponent
r	[1/s]	Reaktionsrate
r_0	[1/s]	Basisreaktionsrate
Q_a	[J]	Aktivierungsenergie
R	[J/molK]	Gaskonstante
T	[K]	Temperatur
\bar{x}	[-]	Zielvariablenvektor
x_n	[-]	Zielvariable
$g_{(x)}$	[-]	Zielfunktion
$p_{i,(x)}$	[-]	Randbedingung - Gleichheitsbedingung
$q_{j,(x)}$	[-]	Randbedingung – Ungleichheitsbedingung
F	[N]	Kraft
I	[m ⁴]	Trägheitsmoment
b	[m]	Breite
h	[m]	Höhe
L	[m]	Länge
M_b	[Nm]	Biegemoment
V	[m ³]	Volumen
m	[kg]	Masse
K_{ij}	[-]	globale Steifigkeitsmatrix
u_i	[mm]	Verschiebungsvektor

F_j	[N]	Kraftvektor
D	[-]	Proportionalitätskonstante
Δl	[m]	Längenänderung
σ_{ij}	[MPa]	Spannungstensor
C_{ijkl}	[-]	vierstufiger Nachgiebigkeitstensor
ϵ_{kl}	[-]	Dehnungstensor
α_{kl}	[W/m ² K]	Wärmeübergangstensor
σ_{ii}^E	[MPa]	Eigenspannungstensor
σ	[MPa]	Normalspannung
τ	[MPa]	Schubspannung
ν	[-]	Poisson-Zahl
γ	[-]	Scherung
C_{xx}	[-]	unbekannte Werkstoffparameter
X, X_0	[-]	Eigenschaft der Werkstoffes
n, p	[-]	Korrelationsparameter für den Potenzansatz
U	[J]	Verformungsenergie
δ	[mm]	Verschiebung in Krafrichtung
l	[mm]	Strebenlänge
d	[mm]	Strebendurchmesser
A	[mm ²]	Strebenquerschnitt
ζ	[N/m]	Federkonstante
κ	[-]	Kühleffizienz
\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestrom
α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskonstante
Re	[-]	Reynolds Zahl
Nu	[-]	Nusselt Zahl
Pr	[-]	Prandtl Zahl
v_1	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit H ₂ O
η_R	[-]	Wirkungsgrad Kühlrippe
Θ	[-]	Übertemperatur
d_o	[mm]	optimierter Kühnadeldurchmesser
l_o	[mm]	optimierte Kühnadellänge
q_b	[W]	Wärmebelastung

θ_b	[K]	Kühladelbasistemperatur
P_K^E	[W]	Kühlleistung pro Element
σ_{th}	[MPa]	Thermospannung
R_s	[K]	Thermoschockparameter
M_e	[W/mK]	Merit Zahl
σ_l	[N/m]	Oberflächenspannung
$\Delta H_{v,l}$	[J/kg]	Verdampfungsenthalpie
ν_l	[m ² /s]	kinematische Viskosität
E_{ab}	[J]	absorbierte Energie
σ_{pl}	[MPa]	Plateauspannung
E^G	[MPa]	Elastizitätsmodul der Gitterstruktur
λ_z	[μm]	mittlerer Zelldurchmesser
y	[$\mu\text{m}/\sqrt[3]{\text{s}}$]	werkstoffabhängiger Wachstumsparameter
t_f	[s]	Erstarrungszeit
T_{S-L}	[K]	Erstarrungsintervall
α^{geo}	[°]	Strukturwinkel
$R_{a,L-PBF}$	[μm]	Mittenrauheit von additiv gefertigten Oberflächen
k_{alt}	[Anz.]	Anzahl der Bauteile im Ausgangsdesign
k_{neu}	[Anz.]	Anzahl der Bauteile im optimierten Design
α_{sk}	[-]	Schwankungsbreite
β	[-]	Spannungstoleranz
σ_{max}	[MPa]	maximale Spannung
A_i	[mm ²]	Querschnittsflächen
Ω_{ToFe}	[cm ³ /gMPa ^{-$\frac{3}{2}$}]	Fertigungskennwert
l_{Layer}	[mm]	Belichtungslänge pro Schicht
t_n	[s]	Netto-Bauzeit
t_i	[-]	Fertigungszeitkennwert
V_{BOX}	[mm ³]	gesamtes eingeschlossenes Volumen
$G_{structure}$	[kg]	Bauteilgewicht
du	[mm]	Verschiebungen
$d\varphi$	[°]	Verdrehungen
κ	[-]	Wirkungsgrad für Wärmetransport
φ	[-]	Flächenteiler

x	[m]	charakteristische Länge
U_{KR}	[m]	Umfang der Kühlrippe
A_{KR}	[m ²]	Querschnittsfläche der Kühlrippe
L_{KR}	[m]	Länge der Kühlrippe
ΔP_c	[Pa]	Kapillardruck
ΔP_{lf}	[Pa]	Druckverlust durch Flüssigkeitstransport
ΔP_{vf}	[Pa]	Druckverlust durch Dampftransport
ΔP_g	[Pa]	Druckverlust durch Gravitation
r_1, r_2	[m]	Meniskusradien
σ_{st}	[N/m]	Oberflächenspannung
R_K	[m]	Ersatzradius für zylindrische Kapillare
r_e	[m]	Kapillarradius
θ	[°]	Benetzungswinkel
a_T	[mm]	Aufmaß für Treppeneffekt
s_{HAZ}	[mm]	Breite der Wärmeeinflusszone

Kurzfassung

Generative Fertigungsverfahren ermöglichen neue Wege, Bauteile hinsichtlich Steifigkeit und Materialausnutzung zu gestalten. Die Topologieoptimierung skizziert einen technischen Rahmen für die Entwicklung hochkomplexer Bauteile. Vereint man beide Technologien sind nahezu alle Bauteilgeometrien realisierbar.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Bestimmung der Potentiale sowie auch die Einschränkungen bei der Verwendung von Gitterstrukturen für die Optimierung und der anschließenden Herstellung durch die additive Fertigung. Darüber hinaus werden auch die Einflüsse einer Wärmebehandlung auf das Gefüge und auf die mechanischen Eigenschaften der additiv hergestellten Bauteile untersucht. Alle Informationen aus diesen Schwerpunkten wurden in Form von konkreten Anwendungsbeispielen zusammengefasst und diskutiert. Das erste Beispiel ist eine patentierte hybride Materialverbindung zwischen Kunststoff und Metall hergestellt mittels additiver Fertigung und Spritzguss. Die zweite Anwendung ist die Verwendung von Gitterstrukturen für den konturnahen Einsatz in Werkzeugkühlsystemen. Basierend auf dieser Untersuchung wird die Anwendbarkeit von Gitterstrukturen in Heat Pipes und Thermosifons diskutiert.

Abschließend werden speziell für Gitterstrukturen erweiterte Designrichtlinien definiert. Für die automatisierte Berechnung der mechanischen Eigenschaften von Gitterstrukturen wird ein MatLab Programm vorgestellt, dass die Erkenntnisse aus den analytischen und praktischen Untersuchungen vereint.

Abstract

The additive manufacturing technology provide new possibilities to design products with increased stiffness under consideration of material saving. The optimisation methods establish a technical framework to develop products with a very high complexity. Finally, it is possible to produce any shape and geometry by combination of the additive manufacturing technology and the optimisation methods.

One topic of the present work is the investigation of the potentials and restrictions of lattice structures used for optimisation under consideration of the additive manufacturing technology. Furthermore, the influence of different heat treatment cycles on the microstructure and the mechanical properties of additively manufactured parts is investigated. After the general development and investigation of the relationship between these topics, several applications are designed and analysed to evaluate the theoretical statements. The first case study is a patented multimaterial hybrid joint manufactured by the help of additive manufacturing and injection moulding. The second application is the applicability of lattice structures for high performance and conformal cooling systems for tools. Based on this approach, the manufacturability and applicability of lattice structures within heat pipes or thermo syphons is discussed.

Finally, extended design rules are defined for the use of lattice structures in new developed parts. For the automated calculation of the mechanical properties of lattice structures and under consideration of the analytic and practical investigation results, a MatLab code is presented.

Inhalt

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	I
DANKSAGUNG	II
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	III
FORMELZEICHEN	IV
KURZFASSUNG	IX
ABSTRACT	X
1 EINLEITUNG	1
2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	3
3 STAND DER TECHNIK	4
3.1 ADDITIVE FERTIGUNG	4
3.1.1 <i>LASER-POWDER BED FUSION (L-PBF)</i>	5
3.1.2 <i>PROZESSRESTRIKTIONEN DER METALLISCHEN ADDITIVEN FERTIGUNG</i>	8
3.1.3 <i>KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG</i>	8
3.1.4 <i>DATENFLUSS BEI DER ADDITIVEN FERTIGUNG</i>	9
3.1.5 <i>STL – STANDARD TESSELATION LANGUAGE</i>	10
3.2 LEICHTBAU	12
3.2.1 <i>FERTIGUNGSTECHNOLOGIERESTRIKTIONEN</i>	14
3.2.2 <i>LEICHTBAU DURCH WERKSTOFFE</i>	15
3.2.3 <i>KENNWERTE UND FORMFAKTOREN FÜR DEN LEICHTBAU</i>	17
3.3 OPTIMIERUNG VON BAUTEILEN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG	22
3.3.1 <i>ANALYTISCHE UND GRAPHISCHE OPTIMIERUNG</i>	23
3.3.2 <i>NUMERISCHE OPTIMIERUNG</i>	25
3.3.3 <i>DAS HOOK'SCHE GESETZ</i>	26
3.3.4 <i>ALGORITHMEN FÜR DIE OPTIMIERUNG</i>	27
3.3.5 <i>TOPOGRAPHIEOPTIMIERUNG (2D)</i>	29
3.3.6 <i>TOPOLOGIEOPTIMIERUNG (2D/3D)</i>	30
3.3.7 <i>GRÖßEN- UND FORMOPTIMIERUNG (3D)</i>	30
3.3.8 <i>OPTIMIERUNG DURCH GITTERSTRUKTUREN (3D)</i>	30
3.3.9 <i>OPTIMIERUNGSPARAMETER</i>	31
3.4 EIGENSCHAFTEN VON GITTERSTRUKTUREN	33
3.4.1 <i>MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN NACH ASHBY</i>	33
3.4.2 <i>DAS ABOAV-WEAIRE GESETZ</i>	36

3.4.3	<i>GITTERSTRUKTUREN FÜR DEN LEICHTBAU</i>	37
3.4.4	<i>RELEVANTE GITTERTYPEN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG</i>	38
3.5	ALUMINIUM ALS LEICHTBAUWERKSTOFF	39
3.5.1	<i>REINES ALUMINIUM (>99,5%)</i>	42
3.5.2	<i>AL-SI LEGIERUNGSSYSTEM</i>	43
3.5.3	<i>AL-SI-MG LEGIERUNGSSYSTEM</i>	44
3.5.4	<i>WÄRMEBEHANDLUNG UND MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN</i>	45
3.5.5	<i>MIKROSTRUKTUR NACH DER ADDITIVEN VERARBEITUNG</i>	50
3.6	ANWENDUNGSGEBIETE FÜR ZELLULÄRE STRUKTUREN	54
3.6.1	<i>ANWENDUNG FÜR HYBRIDE METALL/POLYMER VERBINDUNGEN</i>	55
3.6.2	<i>ADDITIVE FERTIGUNG IM WERKZEUGBAU - KÜHLUNG I</i>	58
3.6.3	<i>ADDITIVE FERTIGUNG IM WERKZEUGBAU - KÜHLUNG II</i>	66
3.6.4	<i>ADDITIVE FERTIGUNG IM WERKZEUGBAU - KÜHLUNG III</i>	67
4	METHODENDURCHFÜHRUNG	70
4.1	MECHANISCHE KENNWERTE EINER RHOMBISCH-DODEKAEDRISCHEN EINHEITSZELLE	70
4.2	PRAKTISCHE BESTIMMUNG VON GITTEREIGENSCHAFTEN	72
4.2.1	<i>DEFORMATIONSMECHANISMUS</i>	73
4.2.2	<i>ERGEBNISSE</i>	74
4.2.3	<i>VERGLEICH MIT DEN ANALYTISCHEN ERGEBNISSEN</i>	76
4.3	LPCALCV0.1 – MatLAB	77
4.3.1	<i>BERECHNUNG</i>	78
4.3.2	<i>BERECHNUNG DER GITTERKENNWERTE</i>	79
4.3.3	<i>AUSGABE DER BERECHNETEN GITTERKENNWERTE</i>	80
4.3.4	<i>STL-DATENSATZ - EXPORT</i>	80
4.3.5	<i>BDF-DATENSATZ – EXPORT</i>	80
4.4	GITTERSTRUKTUREN FÜR HYBRIDE WERKSTOFFVERBINDUNGEN	81
4.4.1	<i>CHARAKTERISIERUNG DER VERBINDUNGSZONE</i>	82
4.4.2	<i>HERSTELLUNG DER METALLISCHEN PROBENGEOMETRIE</i>	83
4.4.3	<i>HERSTELLUNG DER HYBRIDVERBINDUNG</i>	84
4.4.4	<i>ERGEBNISSE DER HYBRIDVERBINDUNG</i>	84
4.5	WÄRMEBEHANDLUNG VON ADDITIV GEFERTIGTEN BAUTEILEN	87
4.5.1	<i>ERGEBNISSE DER WÄRMEBEHANDLUNGSVERSUCHE</i>	89
4.6	PROZESSPARAMETER FÜR ALSi10Mg	92
4.7	PARAMETERSTUDIE: HATCHABSTAND	94
4.8	PARAMETERSTUDIE: LEISTUNG UND SCANGESCHWINDIGKEIT	94
4.9	KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN FÜR GITTERSTRUKTUREN	96
4.9.1	<i>BAUFEHLER</i>	97
4.9.2	<i>STRUKTURWINKEL</i>	98
4.9.3	<i>MINIMALER STREBENDURCHMESSER UND WANDSTÄRKE</i>	99
4.9.4	<i>PROZESSBEDINGTE OBERFLÄCHE</i>	99
4.9.5	<i>TREPPENEFFEKT</i>	100

4.9.6	ZUSAMMENFASSUNG NEUER KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN	100
4.10	KENNZAHLEN UND FORMFAKTOREN FÜR L-PBF	101
4.10.1	FUNKTIONSINTEGRATION F_i	101
4.10.2	WERKSTOFFAUSNUTZUNG W_i	102
4.10.3	BAUTEILORIENTIERUNG O_i	103
4.10.4	FERTIGUNGSZEIT T_i	103
4.10.5	OPTIMIERUNGSGRAD M_i	104
4.10.6	KENNZAHLEN AM BEISPIEL EINES HEBELTORSOS	105
5	DISKUSSION	108
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	110
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	112
8	TABELLENVERZEICHNIS	116
9	LITERATURVERZEICHNIS	117
10	ANHANG: A – RECHENBEISPIELE	130
10.1	ADD. KAPITEL 3.1 – SCHMELZWÄRME	130
10.2	ADD. KAPITEL 3.2.1 – FERTIGUNGSTECHNOLOGIE-RESTRIKTIONEN	130
10.3	ADD. KAPITEL 3.2.2 - LEICHTBAU DURCH WERKSTOFFE	131
10.4	ADD. KAPITEL 3.2.3 - MATERIALEFFIZIENZ	131
11	ANHANG: B – BASISPROGRAM	132
12	ANHANG: C – SUBROUTINEN	146

1 Einleitung

Die aktuelle Fertigung ist geprägt durch einen immer weiter steigenden Innovationsdruck. Im Zuge dessen werden natürlich Aspekte wie Time-to-Market und Wirtschaftlichkeit stark beeinflusst. Neben diesen Aspekten gibt es aber weitere, das Bauteildesign bestimmende Faktoren die sich bis heute und auch in weiterer Zukunft stark auf die Entwicklung neuer Bauteile auswirken. Diese Faktoren wären eine individuelle Designgestaltung und eine daraus folgende geringe Stückzahl sowie eine deutlich gesteigerte Komplexität der Bauteile. Zusätzlich soll das individualisierte und komplexe Bauteil auch die Qualitätsanforderung (Oberflächenqualität, Haptik oder Funktions- und Anbindungsflächen) erfüllen, wenn nicht sogar übertreffen. Dieses Anforderungsprofil für neu entwickelte Bauteile ist in der Regel nur mit Abstrichen für die konventionellen Fertigungstechnologien geeignet und vor allem wirtschaftlich.

Hinzu kommt die speziell in der Luft- und Raumfahrt geforderte Gewichtsrestriktion. Die aktuelle Entwicklungsgrundlage für derartige Bauteile basiert in der Regel auf klassischen Leichtbauprinzipien.

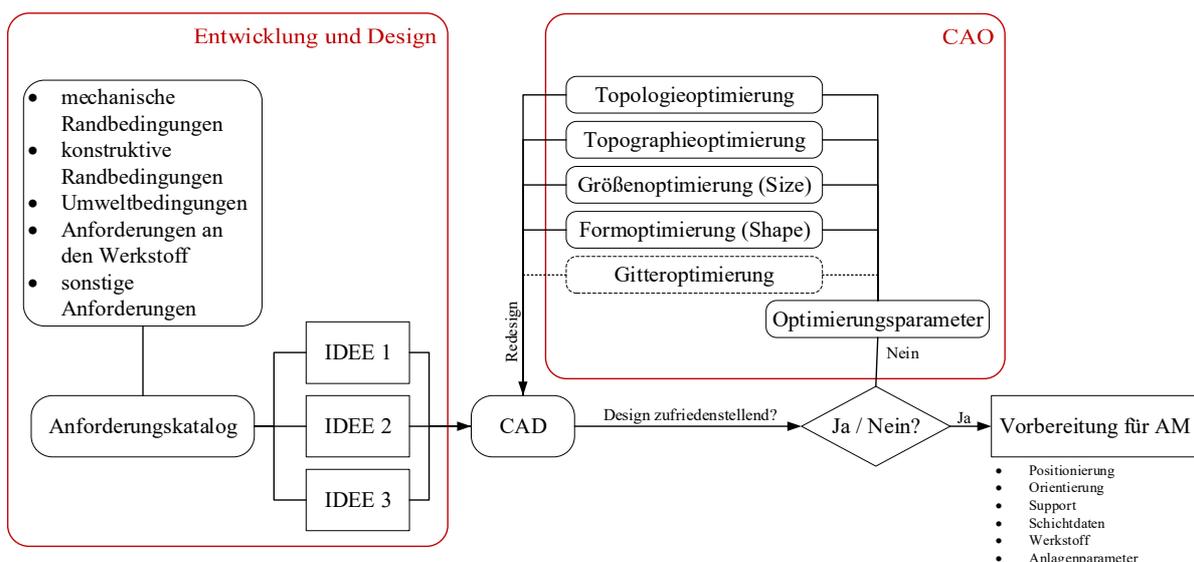


Abb. 1.1: Schema für die Geometrierstellung von optimierten AM-Bauteilen

Nicht selten kommen hierfür spezielle FE-Programme (Finite Elemente) zum Einsatz, mit deren Hilfe über unterschiedlichste Optimierungsalgorithmen optimale Geometrien für vordefinierte Lastfälle erzeugt werden können. Abhängig vom jeweiligen Optimierungsziel sind die Optimierungsverfahren die Topologie-, Topographie-, Size- und Formoptimierung. Neben diesen Optimierungsverfahren entwickelte sich eine weitere Methode um leichte und steife Strukturen zu erzeugen – die Gitteroptimierung. Das Potential von Gitterstrukturen ist unter anderem im extremen Leichtbau zu finden. So können zuvor topologieoptimierte Bauteile durch die Substitution von Strukturbestandteilen mit Gitterstrukturen (stochastisch oder regulär) nachträglich hinsichtlich Materialeffizienz aber auch hinsichtlich Komplexität weiter optimiert werden. Dadurch ergibt sich allein während des Optimierungszyklus im Designprozess eine oft mehrmals zu durchlaufende Entwicklungsschleife (Abb. 1.1) bis das finale Design gefunden wird. Ergebnis einer derartigen Bauteiloptimierung ist in der Regel eine Struktur die konventionell nicht herstellbar ist. Eine Lösung des fertigungstechnischen Problems bietet hierbei die additive Fertigung (AM).

Im Kontrast zu den konventionellen Fertigungsverfahren wie Walzen, Schmieden oder Gießen, lassen sich mit der Hilfe der additiven Fertigung auch hochkomplexe Geometrien mit z.B. Hinterschnitten und unterschiedlichsten Wandstärken herstellen. Zusätzlich bietet die additive Fertigung die Möglichkeit unterschiedlichste Werkstoffe zu verwenden. So können Probleme wie z.B. das starke Rückfederungsverhalten von hochfesten Werkstoffen [135] (z.B. IN718 [136] oder HC300LA [89]) im Gegensatz zu konventionellen Umformtechnologien umgangen werden. Diese Aspekte und die dafür zur Verfügung stehende Fertigungstechnologie ermöglichen schlussendlich die Herstellung hochspezialisierter und werkstofftechnisch anspruchsvoller Bauteile und Produkte.

Der Konstrukteur spielt neben der Herstellbarkeit ebenfalls eine große Rolle bezüglich der steigenden Anforderungen. Der Bauteil- oder Produktdesigner darf, um das volle Potential der additiven Fertigung ausschöpfen zu können, sich nicht nur auf konventionelle Konstruktionsstrategien und Regelungen beziehen. Zusätzlich zu den klassischen maschinenbaulichen Richtlinien sind auch erweiterte Kenntnisse in der FEM (Finite Elemente Methode), vom Werkstoffverhalten sowie vor allem Kenntnisse des additiven Fertigungsprozesses zwingend erforderlich um qualitativ hochwertige optimierte Bauteile zu entwickeln.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit wird ein umfassendes Bild über die Potentiale und Einschränkungen von Gitterstrukturen für die additive Fertigung erstellt. Grundsätzlich wird den Gitterstrukturen ein großes Potential hinsichtlich Leichtbau und Optimierung sowie in Bezug auf eine umfassende Funktionsintegration zugeschrieben. Diese Annahmen werden auf der Basis von analytischen, numerischen und praktischen Methoden eingehend untersucht. Ziel ist die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von additiv hergestellten Gitterstrukturen für eine nachträgliche Anwendung in unterschiedlichen Bauteilen.

Zusätzlich wird das Werkstoffverhalten eines typischen Leichtbauwerkstoffes (AlSi10Mg) nach unterschiedlichen Wärmebehandlungen untersucht. Von konventionellen Werkstoffsystemen (Aluminium Knet- und Gusslegierungen) ist bekannt, dass sich das Mikrogefüge und somit die mechanischen Eigenschaften durch eine entsprechende Wärmebehandlung gezielt beeinflussen und einstellen lassen.

Die Ergebnisse aus den analytischen und praktischen Berechnungen sowie die Erkenntnisse aus der Wärmebehandlungsstudie werden in Form von speziellen Kennzahlen für additiv gefertigte Gitterstrukturen (oder optimierte Bauteile) zusammengefasst und anhand eines konkreten Beispiels evaluiert. Zusätzlich werden aus den durchgeführten Untersuchungen erweiterte Konstruktionsrichtlinien für die Entwicklung neuer Bauteile mit Gitterstrukturen und für die Herstellung mittels additiver Fertigung definiert.

3 Stand der Technik

3.1 Additive Fertigung

Die additive Fertigung ist eine noch junge Fertigungstechnologie, die jedoch in den letzten Jahren merklich an Bedeutung gewonnen hat. [130, 152, 154] Aufgrund des zugrundeliegenden Prozessprinzips bietet die additive Fertigung neue Möglichkeiten und Wege Bauteile herzustellen. Das Prinzip der additiven Fertigung ist, dass ein pulverförmiger, fester (Draht) oder flüssiger Grundwerkstoff unter Zuhilfenahme von Laser- oder Elektronenstrahlen aufgeschmolzen und in eine gewünschte Form gebracht wird. Hierbei wird die Geometrie des Bauteils Schicht für Schicht durch Hinzufügen von neuem Material aufgebaut. Der Aufbauvorgang ähnelt dem klassischen Laserauftragsschweißen (Wärmeleitungsschweißen). Der fokussierte Laserstrahl bei der additiven Fertigung schmilzt den Werkstoff selektiv auf, um eine metallurgische Verbindung der einzelnen Schichten zu gewährleisten.

Bei der additiven Herstellung von Kunststoffbauteilen werden komplexe Geometrien z.B. durch die Extrusion eines Kunststoffdrahtes hergestellt. Weitere gängige Verfahren für den Kunststoffbereich sind die pulverbettbasierenden und stereolithographischen (flüssig) Herstellungsverfahren. Beim pulverbettbasierten Druckverfahren werden die Bauteile durch das selektive Schmelzen des pulverförmigen Kunststoffes hergestellt. Die Stereolithographie verwendet als Grundwerkstoff spezielle Kunstharze welche durch Licht selektiv ausgehärtet werden.

Auch in der metallischen additiven Fertigung konkurrieren verschiedene Technologien um die Vorherrschaft. Zum einen sind dies die Fertigungsverfahren die durch klassisches Hinzufügen mittels Schweißen 3D-Geometrien herstellen – das Auftragsschweißen. Dieses Verfahren ist meist an eine nachträgliche CNC Bearbeitung gebunden, da durch den Prozess selbst nur grobe Strukturen abgebildet werden können. Im klassischen Sinn kann das Auftragsschweißen über ein robotergestütztes Schutzgas-Schweißaggregat oder mittels Laser durchgeführt werden. Bei der Fertigung mittels Schweißaggregat wird der Werkstoff als Draht zugeführt. Beim lasergestützten Verfahren hingegen kann der

Werkstoff über eine spezielle Düse dem Laser in Pulverform zugeführt werden. Dieses lasergestützte Verfahren ist unter den Begriffen Laser-Metall-Deposition (LMD), Direct-Energy-Deposition (DED) oder Laser-Cladding (LC) bekannt. Ein wesentlicher Vorteil dieses Prozesses ist die stufenlose Justierung der Legierung durch die Variation der Pulvermischung während des Prozesses. Daher sind auch schichtweise Materialwechsel ohne große Probleme möglich (z.B. Kupferplattierungen oder eine harte Verschleißschicht auf einem weichen aber leitfähigen Grundwerkstoff).

Eine weitere Möglichkeit, Metalle additiv zu verarbeiten sind die pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren. Aufgrund des hohen Energieeintrages (Schmelzwärme von Stahl 270 kJ/kg \rightarrow d.h. die Energie die zum Schmelzen erforderlich ist entspricht der Energiemenge die für die Erwärmung auf ca. 580°C erforderlich ist \rightarrow in 91µs – Berechnung siehe Anhang), werden für diese Verfahren vorwiegend Laser- und Elektronenstrahlen verwendet.

Jedes dieser additiven Fertigungsverfahren besitzt spezielle Vor- und Nachteile die direkt von der Geometrie und dem zu verarbeitenden Werkstoff abhängen. In der Produktentwicklungsphase werden meist handgearbeitete Modelle zur Verdeutlichung von Sachverhalten oder geometrischen Beziehungen hergestellt. Da diese Modelle meist nur einer optischen Demonstration dienen, werden sie aus leicht handhabbaren Werkstoffen hergestellt (Schaum, Holz, Kunstharz, usw.). Benötigt man jedoch ein voll funktionsfähiges Demonstrationsbauteil aus Metall, müssen aufwendig Schablonen oder sogar Werkzeuge für die Fertigung hergestellt werden. Dies mündet in einem erheblichen finanziellen Aufwand. Für diesen und aber auch für andere Anwendungsfälle bietet sich die additive Fertigung an.

3.1.1 Laser-Powder Bed Fusion (L-PBF)

Das „Laser-Powder Bed Fusion“ Verfahren (L-PBF) ist ein Vertreter der additiven Fertigung bei dem Metallpulver mit einem Laser selektiv über den Schmelzpunkt erwärmt und das Bauteil so Schicht für Schicht hergestellt wird. Durch das vorteilhafte Verhältnis von Schmelzbadvolumen zu Bauteilvolumen (Abb. 3.1) werden hohe Abkühlraten von bis zu $10^7 \frac{K}{s}$ erreicht [27]. Eine analytische Abschätzung der prozessspezifischen Kühlrate kann über die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung (F-WLG) durchgeführt werden. [106]

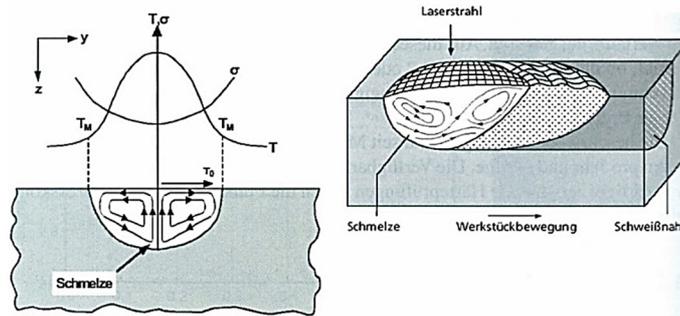


Abb. 3.1: Schmelzbadströmung beim Laserschweißen [134]

Basis ist die Annahme, dass ein sehr kleines flüssiges Volumen (Schmelzetropfen) auf eine deutlich größere (feste) und kühlere Masse trifft (Grundplatte beim L-PBF Prozess). Diese massive Masse besitzt eine deutlich geringere Temperatur als das Schmelzbad was aufgrund der Massenunterschiede zu einem ausgeprägten Temperaturgradienten zwischen der Schmelze (Tropfen) und der Grundplatte (Substrat) führt. Auf dieser Grundlage wird durch anschließendes Einsetzen in die F-WLG ein formaler Zusammenhang für die Bestimmung der Kühlrate für dünne Schichten abgeleitet (Gl. 3.1). [77, 95]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{|\Delta T| \lambda}{\rho c_p z^2} \left[\frac{K}{s} \right] \quad \text{Gl. 3.1}$$

Hierbei stellt ΔT [K] den Temperaturunterschied zwischen Schmelze und Substrat, λ [W/mK] die Wärmeleitfähigkeit, c_p [J/kgK] die spezifische Wärmekapazität, ρ [kg/m³] die Dichte und z [m] die Schichtstärke dar. Am Beispiel des L-PBF Prozesses kann unter der Verwendung dieses Zusammenhanges für den Werkstoff X3NiCoMoTi 18-9-5 eine Kühlrate von $\sim 3 \cdot 10^6 \frac{K}{s}$ und für die Aluminiumlegierung AlSi10Mg eine Kühlrate von $\sim 1,4 \cdot 10^7 \frac{K}{s}$ bestimmt werden (Berechnung siehe Anhang). Zusätzlich ist aus der Gießtechnik bekannt, dass die Ausbildung des Gefüges bei metallischen Werkstoffen unter anderem von den vorherrschenden Kühlraten bestimmt wird. [142, 163] Die hohen Kühlraten des L-PBF Prozesses lassen sich mit denen beim Schmelzschleudern (engl. Metal-Spinning) vergleichen und erzeugen ein sehr feines zellulär-dendritisches Gefüge (Abb. 3.2).

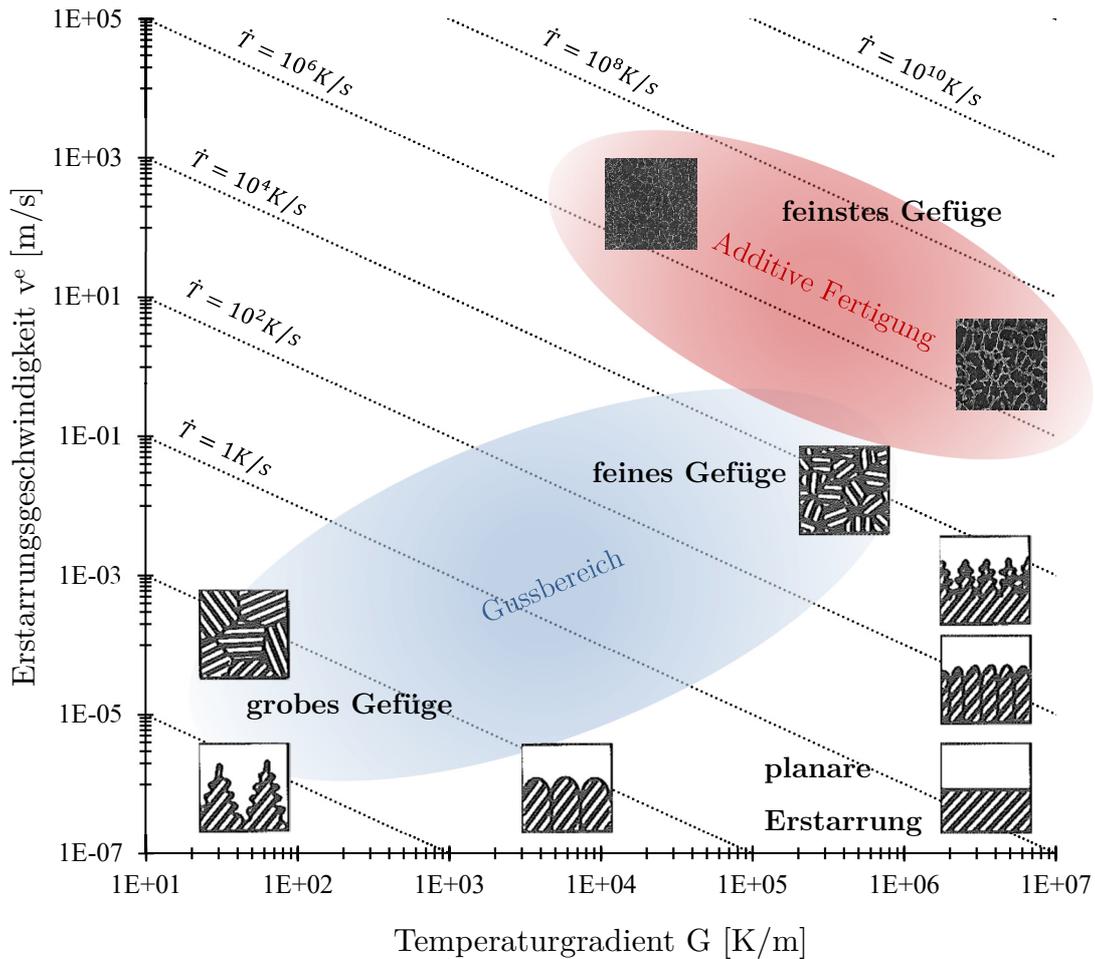


Abb. 3.2: Erweiterte Darstellung der Abhängigkeit der Erstarrungsmorphologie von der Erstarrungsgeschwindigkeit und vom Temperaturgradienten (basierend auf der Originaldarstellung nach W. Kurz und D.J. Fisher [163])

Dieses zellulär-dendritische Gefüge, mit einem mittleren Zelldurchmesser von ca. 700nm, zeigt ähnlich wie metallische Gläser zwar eine hohe Festigkeit, im Gegenzug jedoch auch ein sehr sprödes Werkstoffverhalten. [25, 150] Zusätzlich führen die inhärenten prozessbedingten Eigenspannungen zu einem Verspannen des Gefüges, was die Duktilität ebenfalls senkt. [153] Aus diesem Grund wird nach dem Bauprozess das Bauteil einer werkstoffabhängigen Wärmebehandlung (WBH) unterzogen. Ziel der Wärmebehandlung ist das vorhandene schweißnahtartige Gefüge in einen Zustand mit besseren mechanischen Eigenschaften umzuwandeln.

L-PBF-Bauteile aus z.B. 1.2709 werden im Anschluss an die Fertigung bei 480-500°C [102] wärmebehandelt um höhere Festigkeiten zu erzielen. So können die Festigkeiten von 1100 MPa (wie gebaut) auf ca. 2100 MPa (nach WBH) gesteigert werden. Im Gegenzug reduziert sich die Bruchdehnung von 10% auf ca. 4%. [49]

3.1.2 Prozessrestriktionen der metallischen additiven Fertigung

Durch die Verwendung von Metallpulver als Grundwerkstoff wird ein Katalog an prozess- und werkstoffspezifischen Restriktionen vordefiniert. Zum einen sei die Notwendigkeit einer durchgehenden Verbindung vom Bauteil zur Grundplatte (Substrat) erwähnt. Grund ist die Möglichkeit eines ungehinderten Wärmeflusses ausgehend vom Schmelzbad bis hin zur Grundplatte. Auf der anderen Seite besteht bei metallischen Bauteilen die Notwendigkeit einer soliden Unterstützung von Überhängen und Vorsprüngen. Beim Fehlen einer Stütze bei Überhängen können diese nicht mehr geometrietreu hergestellt werden. Ergebnis ist eine rauere Oberfläche bei negativ geneigten Flächen (Downskin). Eine typische Werkstoffrestriktion ergibt sich durch die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Legierungen. Vom Schweißen sind Grenzwerte für den Kohlenstoffgehalt ($<0,22\text{wt}\%$) für eine rissfreie Verarbeitung bekannt. [75] Für Werkstoffe über $0,22\text{wt}\%$ Kohlenstoff würden spezielle AM-Anlagen mit Bauraumheizung (Temperatur abhängig vom Werkstoff) oder Multi-Laser-Einheiten wobei ein Laser für das Vorwärmen verwendet werden kann, benötigt. Grund hierfür sind die bei einer raschen Erstarrung (ca. $10^5\text{-}10^7\text{ K/s}$) auftretenden Spannungen infolge der Martensitbildung.

Die Verwendung von höheren Bauraumtemperaturen führt jedoch auch dazu, dass das unmittelbar neben dem Bauteil befindliche, nicht verwendete Pulver, durch die hohe Temperaturbelastung unbrauchbar wird und schwer zu entfernen ist (Klumpenbildung, Gefügeveränderung, ...).

3.1.3 Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung

Der klassische Maschinenbau bietet ein reichhaltiges Repertoire an Richtlinien um Bauteile fertigungsgerecht zu entwickeln. So können speziell für das konventionelle oder CNC gesteuerte Fräßen oder Drehen genauso wie für das Gießen die erforderlichen konstruktiven Maßnahmen angewendet werden. Die additive Fertigung ist nun ebenso eine Fertigungstechnologie jedoch mit einem sehr großen Potential hinsichtlich Designfreiheit. Diese Designfreiheit bezieht sich hauptsächlich auf die Möglichkeit komplexe Geometrien oder Hinterschnitte beim Bauteildesign gezielt zu verwenden. Neben diesen neuen Potentialen für die Produktentwicklung entstehen natürlich auch neue prozessspezifische Einschränkungen die berücksichtigt werden müssen. Um diese

Einschränkungen zusammenzufassen, wird ein Richtlinienkatalog für die Konstruktion von AM-Bauteilen entwickelt mit dessen Hilfe zukünftige Bauteile, ausgehend von der Variantenplanung, prozessgerecht entwickelt werden können. Ziel ist vor allem die Kosten für eine nachträglich anfallende prozessgerechte Rekonstruktion sowie die Entwicklungszeit deutlich zu reduzieren. Tab. 3.1 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten konstruktiven Richtlinien für die additive Fertigung

Tab. 3.1: Designrichtlinien für die additive Fertigung [44, 45]

Nr.	Richtlinie	Bemerkung
1	Verwendung von verzugsarmen Werkstoffen	Der prozessbedingte Verzug ist zu berücksichtigen
4	Wärmebehandlung	Reduktion der prozessbedingten Eigenspannungen
5	Funktionsflächen (Dichtflächen, Passungen)	Aufmaß + Nacharbeit (z.B. spanend)
7	Orientierung und Platzierung	Geometrie an geplante Orientierung und Platzierung auf dem Substrat anpassen
8	Prozesscharakteristiken berücksichtigen	kein Bauteilwachstum gegen die Beschichterbewegung
9	Überhänge	horizontale Ausprägungen vermeiden
10	Pulverentfernbarkeit	keine geschlossenen Hohlräume oder Taschen
11	zylindrische Ausprägungen	Bei horizontaler Lage Verformung der Ausprägung berücksichtigen
12	Bauteilanbindung an Substrat	ausreichende Anbindung (große Fläche) an das Substrat (Verzugsspannungen)
13	Querschnittsänderung	sprunghafte und scharfe Übergänge vermeiden – hohe prozessbedingte Thermospannungen

3.1.4 Datenfluss bei der additiven Fertigung

Bevor ein fertiges additives Bauteil entsteht werden Bauteilvarianten in mittels CAD erstellt (Abb. 3.3). Diese Varianten bieten die Grundlage für die weitere Verarbeitung. Ist ein CAD Design ausgewählt, wird der CAD Datensatz (Kurven, Oberflächen und Volumen) über die freie Exportschnittstelle STL (Standard Tessellation Language) in einen Datensatz bestehend aus Dreiecken konvertiert. Dieser beinhaltet i.d.R. konvertierungsbedingte Aufbaufehler wie Lücken oder überlappende Dreiecke. Diese müssen in geeigneten STL Editoren (Magics, Netfabb, usw.) repariert werden. Zusätzlich wird über diese Editoren die grundsätzliche Positionierung des Bauteiles im Bauraum definiert. Soll eine komplexe Geometrie mit Hinterschnitten hergestellt werden, besteht weiters die Möglichkeit spezielle Supportstrukturen zu erzeugen. Ist das Bauteil vollständig vorbereitet, wird die Geometrie (inkl. Supportdaten) über einen implementierten „Slicer“ in gleich dicke Schichten geschnitten. Diese Schichten werden für die weitere Verarbeitung auf der L-PBF Anlage verwendet.

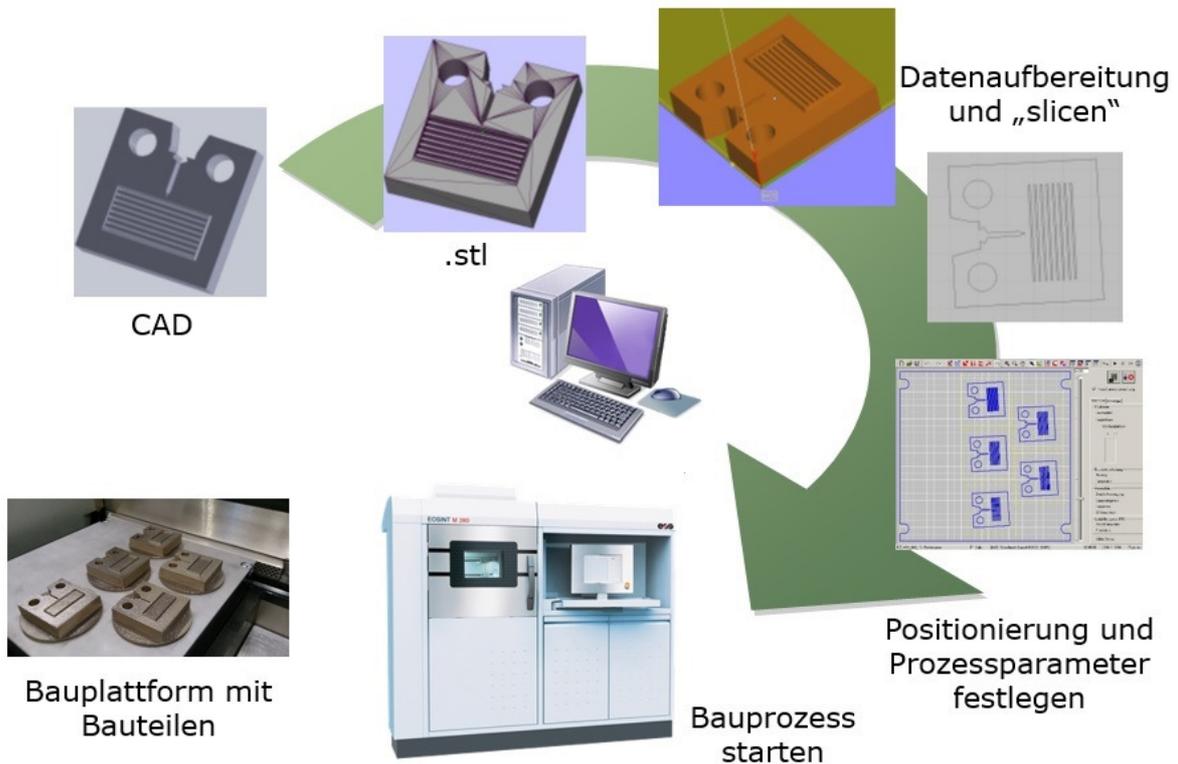


Abb. 3.3: Datenfluss bei der additiven Fertigung – von der Idee zum Bauteil. [44]

Über die anlagenspezifische Prozesssoftware werden die für die Herstellung notwendigen Prozessparameter (Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Hatchabstand, usw.) den einzelnen geschnittenen Bauteilen zugewiesen. Schlussendlich erfolgt nach der Inertisierung des Bauraumes die Fertigung der Bauteile. Während des Baufortschrittes werden die zuvor erzeugten Schichten einzeln belichtet. Dadurch wird das Bauteil Schicht für Schicht aufgebaut. Ist der Bauprozess fertiggestellt, werden die Bauteile von unnötigen Pulver befreit und mittels geeigneter Trennverfahren (Bandsäge oder Drahterodieren) von der Bauplattform (Substrat) getrennt. Abschließend werden konventionell mittels Drehen oder Fräßen die Funktions- oder Passflächen nachbearbeitet und das Bauteil dem jeweiligen Anwendungszweck zugeführt.

3.1.5 STL – Standard Tessellation Language

Dieses Dateiformat wird in der additiven Fertigung für den Geometrietransport vom CAD System zur L-PBF Anlage verwendet. Es basiert auf der Diskretisierung von Oberflächen durch Dreiecke (Abb. 3.4). Diese Dreiecke werden durch Triangulation erzeugt und entweder als „BINARY“ oder als „ASCII“ Datei exportiert.

STL-Erzeugung:

- Umwandeln der Geometrie in eine Punktwolke
- Triangulierung der Punktwolke und Erzeugung eines „wasserdichten“ Polygonnetzes
- Abspeichern der Facetten im stl-Format
- 2D und 3D möglich

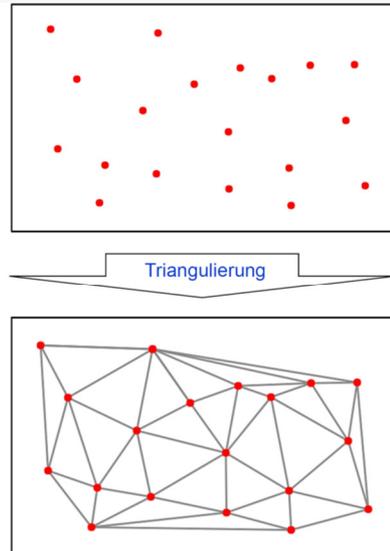
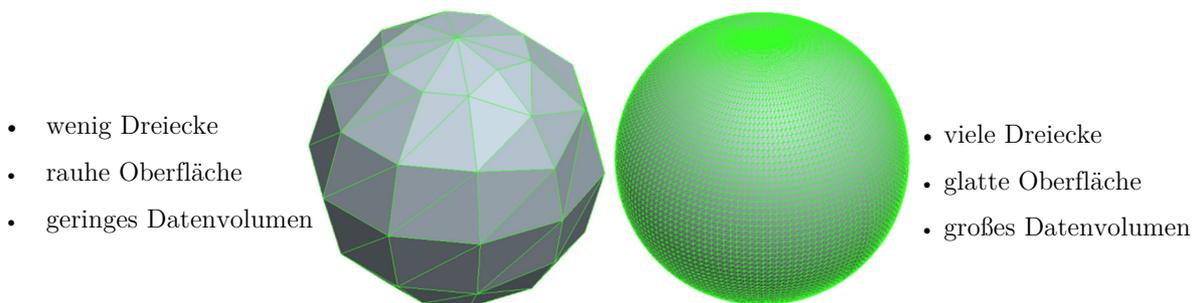


Abb. 3.4: Erzeugung einer STL Datei.

Beide Dateitypen beinhalten die Koordinaten der drei Eckknoten und den Normalenvektor des Dreiecks. Der Unterschied zwischen beiden Standards ist der notwendige Speicherplatz für die erzeugten Dreiecke. Für die Verarbeitung von STL-Dateien werden in der additiven Fertigung unterschiedliche Editoren verwendet. Gängige Vertreter sind Materialise Magics [116] oder Autodesk Netfabb [11]. Diese STL-Editoren werden verwendet um einerseits die Orientierung des Bauteiles im Bauraum der Anlage zu definieren und andererseits um eventuell notwendigen Support zu erzeugen und Reparaturen am STL-Datensatz vorzunehmen. Reparaturen sind i.d.R. immer notwendig um die durch die Konvertierung (CAD→STL) entstandene Geometriefehler wie Löcher oder überlappende Dreiecke zu entfernen.



- wenig Dreiecke
- rauhe Oberfläche
- geringes Datenvolumen

- viele Dreiecke
- glatte Oberfläche
- großes Datenvolumen

Abb. 3.5: Unterschied zwischen einem groben und einem feinen STL Datensatz.

Werden diese Geometriefehler nicht behoben, führen sie während des Bauprozesses zu Baufehlern die zum Abbruch des laufenden Baujobs führen können. Eine weitere wichtige Funktionalität von STL-Editoren ist das „Slicen“ des Datensatzes in die für den Bauprozess benötigten Schichten. Hierbei wird die orientierte und supportete Geometrie

entlang der Baurichtung (bei Pulverbettverfahren die vertikale Richtung) in gleich dicke (Dicke entspricht der Schichtstärke des additiven Prozesses) Schichten geschnitten und exportiert. Die L-PBF Anlage arbeitet diesen Datensatz Schicht für Schicht ab bis das Bauteil erzeugt wurde.

Typische Fehler die durch die Konvertierung von parametrisierten CAD Daten entstehen sind Lücken zwischen Dreiecken, doppelte und überlappende Dreiecke, Falten und eine falsche Orientierung der Dreiecke (Innenseite des Körpers zeigt bei einem Dreieck nach außen). Zusätzlich wird durch das STL Format eine ursprünglich gekrümmte oder runde Oberfläche facettiert ausgeformt (ähnlich wie bei der Diskretisierung von gekrümmten Oberflächen in der FEM). Eine genauere Abbildung einer gekrümmten Oberfläche führt zu einer deutlichen Erhöhung der benötigten Anzahl an Dreiecken was weiter zu einer Erhöhung des benötigten Speicherplatzes führt.

3.2 Leichtbau

Im klassischen Leichtbau wird zu einem großen Teil auf konventionelle Fertigungstechnologien Rücksicht genommen. Aktuelle Technologien wie die „Additiven Fertigungsverfahren“ bieten für den Leichtbau die einzigartige Möglichkeit, auf der Grundlage der klassischen Leichtbauberechnungs- und Bemessungsmethoden, hochgradig optimierte Leichtbauteile ohne Rücksicht auf Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren herzustellen.

Der klassische Leichtbau unterteilt sich in [76]:

1. stofflicher Leichtbau → Werkstoff
2. Formleichtbau → Struktur
3. Fertigungsleichtbau → Bauweise
4. Konstruktionsleichtbau → Materialeinsparung
5. Funktionsleichtbau → Funktionsintegration

Zu jedem der einzelnen Leichtbauweisen werden je nach verwendeten Fertigungsverfahren Vor- und Nachteile sowie herstellbare und nicht herstellbare Lösungen gefunden. Die additive Fertigung ermöglicht den Aufbau von beliebigen Geometrien nach dem Schichtprinzip.

Tab. 3.2: Vor- und Nachteile der additiven Fertigungstechnologien im Hinblick auf fünf Kernelemente des klassischen Leichtbaus.

Nr.	Konzept	Vorteil	Nachteil
1	Werkstoff	<ul style="list-style-type: none"> • breites Werkstoffspektrum einsetzbar • IN718, TiAl6-4, AlSi10Mg, X3NiCoMoTi 18-9-5 • homogene Elementverteilung 	<ul style="list-style-type: none"> • Werkstoffe mit höherem Kohlenstoffgehalt ($[C] > 0,22 \text{ wt\%}$) aufgrund der HeiBrissgefahr nur unter speziellen Bedingungen oder Umbauten der Anlage verwendbar • Werkstoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 250 \frac{W}{mK}$) nur mit höheren Laserleistungen druckbar (Anlagengröße!)
2	Form	<ul style="list-style-type: none"> • nahezu uneingeschränkte Designfreiheiten • komplexe Hohlraumstrukturen „realisierbar“ • hoher Individualisierungsgrad für jedes Bauteil (z.B. für Entwicklungsschleifen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrien mit einem überkritischen Überhang ($\alpha > 30^\circ$) sind nicht in akzeptabler Qualität herstellbar • Geometrie muss an den Wärmefluss und Stabilitätsbedingungen angepasst werden
3	Fertigung	<ul style="list-style-type: none"> • keine Werkzeuge notwendig (Kosteneinsparung) • schichtweiser Materialmix (grundsätzlich) bei einigen AM-Verfahren möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Instandhaltungskosten der Lasereinheit (Scanner- und Lasereinheit, z.B. $K_{F-\theta} > 8000\text{€}$) • Hohe Investitionskosten (Anschaffung der Anlage) • Zeitintensiv (bei voluminösen Geometrien)
4	Konstruktion	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeit einer 1:1 Anwendung der Ergebnisse einer FEM-Topologie- und Topographieoptimierung • Herstellung von inneren Gitterstrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> • Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung der Optimierungsmethoden ist eine fundierte Kenntnis in den Bereichen Mechanik, Festigkeitslehre, Physik • Vollständiges AM-Prozessverständnis vorausgesetzt
5	Funktion	<ul style="list-style-type: none"> • Implementieren von Funktionen in ein Bauteil • Zusammenfassen von mehreren Bauteilen zu einem zusammenhängenden Bauteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Globale Betrachtungsweisen von Bauteilen notwendig • Keine Bauteil-/Funktionsspezifischen Lösungen \rightarrow Baugruppenlösung, Funktionsintegration

So können Werkzeuge mit konturnahen Kühlkanälen oder komplexen Hinterschnitten einfach und verhältnismäßig schnell hergestellt werden. Anzumerken ist jedoch, dass aufgrund der hohen Anschaffungs- und Rohmaterialkosten beim momentanen Stand der Technik der Fokus auf der Prototypen- und Einzelteilerfertigung bzw. Kleinstserie liegt. Listet man die oben genannten Leichtbaukonzepte tabellarisch auf und ergänzt sie um die Vor- und Nachteile der L-PBF-Technologie (Tab. 3.2), ergibt sich eine Übersicht der technologischen Möglichkeiten, die diese Technologie für den Leichtbau bereitstellt.

3.2.1 Fertigungstechnologierestriktionen

Die wesentlichen Prozesseinflussgrößen beim L-PBF-Prozess sind die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit. Die Laserleistung bestimmt die vom Laser bereitgestellte Energie. Diese Energie wird zum Schmelzen des Werkstoffes (des Pulvers) verwendet. Analog zur klassischen Schweißtechnik kann bei L-PBF-Prozessen die eingebrachte Energie über die Streckenenergie E^l [J/mm] berechnet werden. [51]

$$E^l = \frac{P}{v} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Hierbei stellt P [W] die eingestellte Laserleistung und v [mm/s] die zugehörige Scangeschwindigkeit dar. Für den L-PBF Prozess wird die Streckenenergie abgewandelt und mit weiteren wichtigen Prozessparametern ergänzt, die Schichtstärke z [mm] und den Hatchabstand h [mm]. Ergebnis ist die Volumenenergie E^v [J/mm³] die ein Maß für die eingebrachte Energie und einen wesentlichen vergleichbaren Parameter für Verarbeitbarkeitsstudien darstellt.

$$E^v = \frac{P}{v * h * z} \quad \text{Gl. 3.3}$$

Um jedoch die tatsächlich absorbierte Energie zu erhalten, muss die Interaktion zwischen der Strahlquelle (bei L-PBF: Laser) und dem zu verarbeitenden Metallpulver genauer betrachtet werden. Eine charakteristische Eigenheit metallischer Pulver ist die Reflexion von Strahlung. Der Anteil der reflektierten Strahlung ist abhängig von der jeweiligen Wellenlänge des Lasers (Abb. 3.6). Bei den gängigen L-PBF Anlagen ist ein Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 1064nm verbaut. Stahlpulver absorbieren bei dieser Wellenlänge ca. 30% der Laserenergie [39, 82]. Bei Aluminium hingegen kann aufgrund der Wellenlänge nur 5% der Laserenergie absorbiert und für das Schmelzen des Pulvers verwendet werden. Reines Kupfer weist einen Absorptionsgrad von unter 1% auf wodurch dieser Werkstoff in Reinform auf Anlagen mit einem 400W Yb-Faserlaser nicht zu verarbeiten ist.

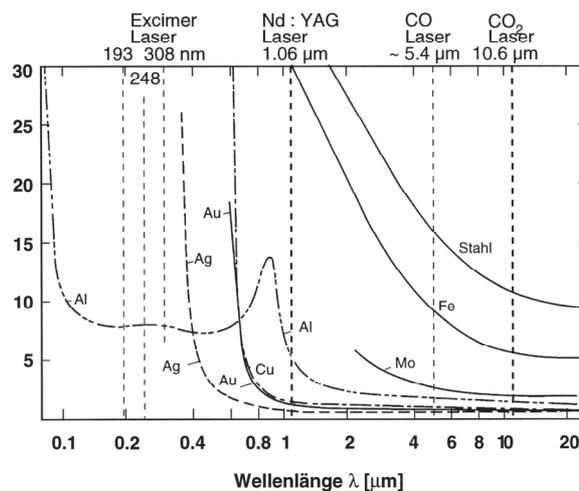


Abb. 3.6: Absorptionsgrad von Metallpulvern für einige Lasertypen [39]

Ein weiterer Effekt, der die Leistungsausbeute leicht erhöht ist die Mehrfachreflexion zwischen den einzelnen Pulverteilchen. Diese kommt zustande, wenn der Laserstrahl durch den Aufprall auf ein Pulverpartikel abgelenkt wird und ein Nachbarpartikel trifft. Hierbei kommt es abermals zur Absorption oder wieder zur Reflexion. Dadurch ist der effektive Absorptionsgrad des Pulvers für den Laser höher, als bei der Interaktion mit Bulkmaterial. Neben der werkstoffspezifischen Absorption ist auch die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Werkstoffes ausschlaggebend für die Verarbeitbarkeit von metallischen Pulver. Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer erschwert zusätzlich neben dem Wellenlängeneffekt das gezielte Schmelzen des Pulvers. Diese Kernaspekte erklären weiter auch, warum für ein X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709) Pulver eine Leistung von 225W und für AlSi10Mg (AC43000), welches einen deutlich niedrigeren Schmelzpunkt besitzt als der erwähnte Werkzeugstahl, eine Leistung von 370W benötigt wird.

Damit das erzeugte Schmelzbad erstarren kann, muss weiter die eingebrachte (Wärme-) Energie abfließen können. Daraus resultiert ein ununterbrochener Wärmefluss vom Schmelzbad bis hin zur Grundplatte, dem Ort über den die Energie abgeführt wird.

3.2.2 Leichtbau durch Werkstoffe

Durch höherfeste Werkstoffe können deutlich dünnere Querschnitte realisiert werden. Daraus ergibt sich der erste Ansatzpunkt für eine Leichtbaustrategie. Durch die gezielte Anwendung von hochfesten Werkstoffen und Werkstoffkombinationen können einfache

Leichtbauziele realisiert werden. Wird z.B. ein Stab aus Aluminium (Al99,5) mit einer Zugkraft von $F=1000\text{N}$ beansprucht, benötigt dieser Stab einen minimalen Querschnitt von 50mm^2 um der Belastung Stand zu halten. Wird der gleiche Stab aus St52 hergestellt, ist ein Querschnitt von $2,2\text{mm}^2$ ausreichend. Ergebnis dieser Gegenüberstellung ist, dass ein Stab aus St52 bei gleicher Belastung einen deutlich geringeren Querschnitt benötigt ohne dabei zu versagen was weiter zu einer Reduktion der Masse (unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dichten der Werkstoffe) führt. Ein wesentlicher Faktor beim Werkstoffleichtbau ist der jeweilige Werkstoffpreis. Höherfeste Werkstoffe sind in ihrer Herstellung meist sehr aufwendig und besitzen demnach auch einen wesentlich höheren Werkstoffpreis als maschinenbauliche Grundwerkstoffe wie allg. Baustähle. Zusätzlich zum Werkstoffpreis ist auch die Verarbeitung höherfester Werkstoffe mit zusätzlichen Kosten verbunden. So benötigt man beispielsweise für das Schmieden von hochfesten Werkstoffen, Werkzeuge mit höherer Festigkeit und vor allem einer höheren Verschleißbeständigkeit. Die Anzahl an geeigneten Werkzeugwerkstoffe wird mit zunehmender Bauteilfestigkeit geringer. Aus diesem Grund ist es bei konventionellen Prozessen notwendig, die Festigkeit des Leichtbauteils und die des Werkzeuges auf einander abzustimmen. Die Werkstoffauswahl bei additiven Fertigungsverfahren ist allein durch die maximal verfügbare Energie (Laserleistung) sowie durch die chem. Zusammensetzung limitiert.

Ein wesentlicher Nachteil der L-PBF Technologie bezüglich Werkstoffauswahl ist die Heißrissgefahr bei höherfesten Werkstoffen. Härtbare Werkzeugwerkstoffe besitzen in der Regel einen Kohlenstoffgehalt über $0,4\text{wt}\%$. Andererseits gilt beim L-PBF Prozess, ähnlich wie beim Schweißen, eine Schweißbarkeitsgrenze von $0,22\text{wt}\%\text{C}$ für eine problemlose Verarbeitung. Für Werkstoffe die einen hohen Anteil an z.B. Chrom aufweisen wird neben dem Kohlenstoffgehalt das Kohlenstoffäquivalent CET (Gl. 3.4) berechnet. Dieses Kohlenstoffäquivalent CET berücksichtigt neben dem reinen Kohlenstoffgehalt auch Legierungselemente wie Chrom oder Nickel, die ähnlich wie Kohlenstoff, wesentlich zu Erhöhung der Rissempfindlichkeit beitragen.

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad \text{Gl. 3.4}$$

Sollen Werkstoffe höherer Festigkeit oder mit einem CET zwischen $0,45$ und $0,65\text{wt}\%\text{C}$, additiv verarbeitet werden, müssen Vorkehrungen zur Vermeidung von Rissen getroffen

werden. Die Möglichkeiten beschränken sich prozessbedingt auf eine Bauplattformheizung (von unten). Zu bedenken ist, dass bei jeglicher Zuheizung die Dichtungen und Sensoren hinsichtlich Temperaturbeständigkeit geprüft werden müssen. Für werkstoffspezifische Vorwärmtemperaturen wird auf die Richtwerte beim Schweißen verwiesen welche eine Vorwärmtemperatur von 50-100°C über Martensit-Starttemperatur empfehlen. [161] Die werkstoffspezifische Vorwärmtemperatur kann mit diesem Richtwert aus dem zugehörigen ZTU (Zeit-Temperatur-Umwandlungs Schaubild) ermittelt werden.

Bei herkömmlichen Stahlwerkstoffen ist eine Schutzgasatmosphäre mit Stickstoff ausreichend. Für Aluminium und Titan muss aufgrund der hohen Reaktivität eine spezielle Argonatmosphäre hergestellt werden. Dies verursacht abermals zusätzliche Kosten für die Bereitstellung von Argon (Sicherheitsschrank, Verrohrung, Argongas). Die größten Kostenpositionen beim L-PBF Prozess werden durch den Werkstoff (Metallpulver) und die Anlagenkosten verursacht.

Tab. 3.3: Preistabelle einiger gängiger Werkstoffe für die additive Fertigung [46, 50]

Werkstoff	Preis (2014)	Preisänderung (2017)
	[€/kg]	[€/kg]
X3NiCoMoTi18-9-5	70-140	-15%
IN718	110-140	-15%
IN625	>130	-7%
Ti64 (ELI)	>450	-15%
AlSi10Mg	>110	-32%

Das Personal liefert beim L-PBF Prozess nur einen kleinen Beitrag zu den Bauteilkosten, da eine L-PBF Anlage den Baujob weitgehend autonom abarbeitet. Einzig zur Bestückung, Reinigung und Arbeitsvorbereitung wird Personal benötigt.

3.2.3 Kennwerte und Formfaktoren für den Leichtbau

Damit der Leichtbaugrad quantitativ ermittelt werden kann, wurden unterschiedlichste Kennzahlen für einen intermateriellen Vergleich definiert. Ein gängiger Kennzahlenvertreter ist die so genannte Materialeffizienz ξ . [98]

$$\xi = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \quad \text{Gl. 3.5}$$

Die Materialeffizienz ξ kann allgemein über Gl. 3.5 dargestellt werden. Ashby [111] definierte ein doppellogarithmisches Diagramm mit dem Elastizitätsmodul E als Ordinate und der Dichte ρ als Abszisse. Diese Diagramme sind auch als „Ashby-Maps“ bekannt. Durch die logarithmische Gegenüberstellung von Elastizitätsmodul und Dichte können über unterschiedliche Steigungen belastungsbezogene Vergleiche zwischen den Werkstoffen durchgeführt werden. Gl. 3.6 zeigt die logarithmische Geradengleichung mit dem Parameter n der den Belastungsfall widerspiegelt.

$$E = \sqrt[n]{\rho * \xi} \Rightarrow \log E = \frac{1}{n} \log \rho + \frac{1}{n} \log \xi \quad \text{Gl. 3.6}$$

Hierbei stellt E den Elastizitätsmodul, ξ die Materialeffizienz, n den Belastungsparameter und ρ die Dichte des Bauteils dar. Der Parameter n folgende belastungsfallabhängige Werte annehmen:

- $n = 1$ *Zug, Druck*
- $n = 2$ *Biegestabes*
- $n = 3$ *Biegeplatte*

Zusätzlich erlaubt das Schema des Materialparameters ξ den Vergleich anderer Werkstoffparameter wie der Streckgrenze oder Bruchzähigkeit.

1. Materialeffizienz für die maximal zulässige Spannung σ_f ohne plastische Verformung

$$\bullet \quad R_{ZD} = \frac{\sigma_f}{\rho}, R_{BS} = \frac{\sqrt{2}\sigma_f}{\rho}, R_{BP} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_f}}{\rho}$$

2. Materialeffizienz für Versagen – hohe Bruchzähigkeit und geringes Gewicht

$$\bullet \quad C_{ZD} = \frac{K_{Ic}}{\rho}, C_{BS} = \frac{\sqrt[2]{K_{Ic}}}{\rho}, C_{BP} = \frac{\sqrt[3]{K_{Ic}}}{\rho}$$

Vorteil dieses Materialparameters ist der potentielle Vergleich mehrerer „Strukturen“. Nach dem Ashby-Prinzip können so volle/dichte Querschnitte mit porösen/strukturierten Querschnitten über die relative Dichte ρ^* vergleichbar gemacht werden. Am Beispiel Aluminiumschaum lässt sich so ein wesentlicher Vorteil des Materialkennwertes darstellen (siehe Kapitel 10.4). Dieser signifikante Vorteil von

Schaumwerkstoffen wird z.B. bei Sandwichbauteilen (Abb. 3.7) ausgenutzt, um leichte und steife Strukturbauteile zu erhalten. Neben dieser Materialeffizienzsteigerung erfüllen Schäume und reguläre Strukturen bei Sandwichkonstruktionen noch eine weitere wesentliche Funktion. Der Schaum dient i.d.R. nur dazu, um das Grund- und Deckblech während der Verformung auf Distanz zu halten.

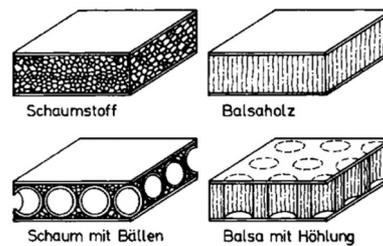


Abb. 3.7: Beispiele für die Sandwich – Kernbauweise [83]

Grund hierfür ist das Widerstandsmoment der Struktur. Dies wird hauptsächlich durch die Außenabmessungen, die Dicke des Sandwichpanels, bestimmt. Je größer das Widerstandsmoment bzw. je dicker das Panel, desto steifer ist die Struktur. Im Falle einer Biegebelastung müssen weiter das Grund- und Deckblech den maximalen Zug bzw. Druck aufnehmen. Somit ist es für die Funktionserfüllung dieses Konstruktionselementes essentiell, dass sich die der Abstand der Bleche nicht verringert. Die Klebestelle zwischen Blech und Kernstruktur bildet in den meisten Belastungsfällen die Schwachstelle der Konstruktion, da die Steifigkeit in hohem Maße von der strukturellen Integrität der Querschnittsfläche abhängt. Lösen sich die Klebe-/Verbindungsstellen zwischen den Komponenten ist ein deutlicher Abfall der Steifigkeit zu erwarten (Abb. 3.8).

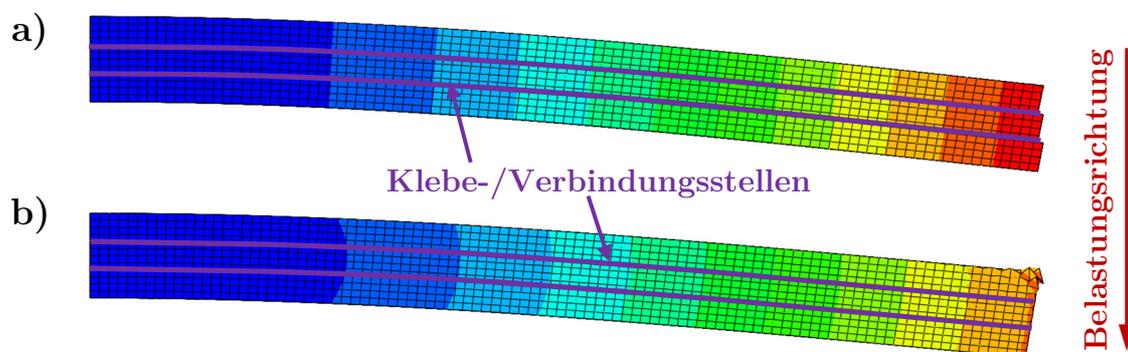


Abb. 3.8: Schematische Darstellung der Biegung eines Balkens bestehend aus drei Komponenten – Absenkung bei a) ohne Reibung $\Delta u=2,1\text{mm}$ und bei b) mit Reibung $\mu=1$ $\Delta u=0,3\text{mm}$. (Simuliert mit Abaqus 6.14)

Weiters wurden von Ashby et al. [111] sogenannte Formfaktoren ϕ definiert. Diese Formfaktoren beschreiben den geometrischen Leichtbaugrad einer Struktur. Mittels Formfaktor können so Skalierungen einer Geometrie mit gleicher Materialeffizienz vorgenommen werden. Grundlegend sind diese Formfaktoren über das Trägheitsmoment des jeweiligen Querschnitts definiert. Ziel ist die Erhöhung des Trägheitsmomentes bei gleichzeitiger Verringerung der Masse. Dies wird durch eine „Umstrukturierung“ der Masse erreicht. Der Formfaktor für eine Biegebelastung wird nach Gl. 3.7 bestimmt.

$$\phi_B^e = \frac{12I}{A^2} \quad \text{Gl. 3.7}$$

Hierbei stellt I das Trägheitsmoment und A die Querschnittsfläche des Biegebalkens dar. Wird nun die Form, nicht aber die Querschnittsfläche verändert, erhöht dies den Formfaktor durch die Erhöhung des Trägheitsmomentes.

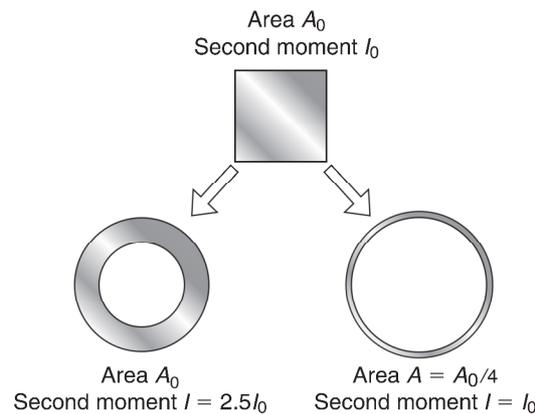


Abb. 3.9: Formfaktoren nach Ashby - Grundprinzip [103]

Für hierarchische Substrukturen wird weiter zwischen Makro- und Mikroformfaktoren unterschieden. Die Mikroformfaktoren spiegeln hierbei die Stützwirkung der kleinsten Substrukturen wieder. (Abb. 3.10)

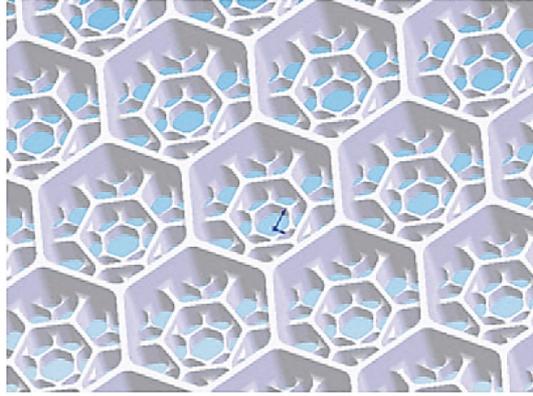


Abb. 3.10: Beispiel einer hierarchischen Honeycomb Struktur [164]

Durch die Verknüpfung von Materialeffizienz und Formfaktor (Gl. 3.8) kann ein noch genaueres Bild des Leichtbaugrades, die formspezifische Materialeffizienz, hergestellt werden [76].

$$\xi_B^\phi = \frac{\sqrt{E/\phi_B^e}}{\rho/\phi_B^e} = \frac{\sqrt{E^*}}{\rho^*} \quad \text{Gl. 3.8}$$

In diesem formalen Zusammenhang repräsentiert ξ_B^ϕ die formabhängige Materialeffizienz für eine Biegebelastung wobei e für den Auslegungsindex (e=elastisch oder f=versagen), B für den Belastungstyp (Biegung oder Torsion) und ρ für die Dichte des Werkstoffes steht. Dieser analytische Ansatz lässt sich analog zur bereits definierten Materialeffizienz für Zug/Druck, Biegestab und Biegeplatte definieren. Deutlich zu erkennen ist, dass eine Erhöhung des Formfaktors zu einer Erhöhung der Materialeffizienz führt.

Zusätzlich zum Vergleich unterschiedlicher Strukturen aus demselben Werkstoff lassen sich mittels Materialeffizienz auch Legierungen sowie unterschiedliche Materialgruppen miteinander vergleichen. Die hohe Effizienz von Substrukturen wurde von Lakes [131] über den Potenzansatz für zelluläre Strukturen nach Gibson und Ashby [100] beschrieben.

Ein weiterer Kennwert, der den Leichtbaugrad numerisch widerspiegelt ist die Leichtbaugüte L . Dieser Kennwert beurteilt nicht nur einzelne Strukturbauteile, sondern ganze Strukturen, z.B. Karosserien. [12] Je nach betrachtetem Belastungsfall kann hier eine Leichtbaugüte L_T für Biegung oder Torsion [74] definiert werden als

$$L_T = \frac{m_{BT}}{c_T * A} \quad \text{Gl. 3.9}$$

mit

$$c_T = \frac{G * J_T}{l_T} \quad \text{Gl. 3.10}$$

und der projizierten Fläche A . m_{BT} steht weiter für die Masse, c_T für die Torsionssteifigkeit, l_T für die axiale Länge, J_T für das polare Widerstandsmoment und G für den Schubmodul des Werkstoffes. Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass Leichtbaukennzahlen oder Leichtbaugütezahlen für einen Vergleich von unterschiedlichen Materialien und Strukturen bei der Werkstoffauswahl während der Konstruktion und Entwicklung eine sehr gute Entscheidungshilfe hinsichtlich leichter und steifer Strukturen bieten.

3.3 Optimierung von Bauteilen für die additive Fertigung

Optimierung im klassischen Sinn wird in vielen Bereichen der Technik, aber auch in anderen Bereichen wie der Betriebswirtschaftslehre angewendet um konventionelle Probleme und Aufgabenstellungen zu lösen bzw. zu optimieren. Kernelement der Optimierung ist die Umwandlung von konkreten technischen Problemen in mathematische Gleichungen. Hierfür ist in der Regel ein fachübergreifendes Wissen der Problemstellung erforderlich, um die korrekten Funktionen und Gleichungen definieren zu können. Das Grundschema ist bei allen Optimierungsaufgaben gleich: [81]

1. Schritt: Problembeschreibung
2. Schritt: Sammeln aller notwendigen Daten
3. Schritt: Definition der Variablen für die Optimierung (Designvariablen)
4. Schritt: Definition der Zielfunktion (Min. oder Max.)
5. Schritt: Formulierung der Randbedingungen
6. Schritt: Lösung des Optimierungsproblems (analytisch, numerisch oder graphisch)

Eine allgemeine Beschreibung eines Optimierungsproblems ist im Folgenden dargestellt. Hierbei werden die veränderlichen Variablen (Designvariablen, Gl. 6.1), die Zielfunktion (GL. 6.2) sowie die Randbedingungen (Design Constraints, Gl. 6.3 und 6.4) mathematisch formuliert. [81]

$$\bar{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad \text{Gl. 3.11}$$

$$g(x) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \rightarrow \text{min. od. max.} \quad \text{Gl. 3.12}$$

$$p_{i,(x)} = p_i(x_1, \dots, x_n) = 0; i = 1 \dots m \quad \text{Gl. 3.13}$$

$$q_{j,(x)} = q_j(x_1, \dots, x_n) \leq 0; j = 1 \dots n \quad \text{Gl. 3.14}$$

Ist das technische Problem auf diesem Wege beschrieben, kann die Optimierung graphisch, analytisch oder numerisch durchgeführt werden.

3.3.1 Analytische und graphische Optimierung

Ein Beispiel für den allgemeinen Ablauf eines einfachen Optimierungsproblems ist ein Biegebalken in Form eines Kragträgers.

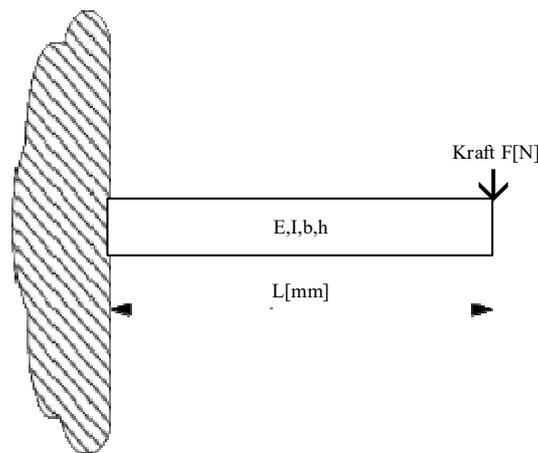


Abb. 3.11: Kragträger für die Optimierung – Ausgangssituation

Die Belastung des Kragträgers wird mit 2.000N bei einer Länge von 2m definiert. Die maximale Absenkung der Balkenspitze ($L=2m$) wird auf maximal 50mm limitiert. Der Kragträger besitzt ein rechteckiges Querschnittsprofil wobei die Breite b und die Höhe h so anzupassen sind, dass sich ein möglichst leichter Balken bei einer gegebenen maximalen Verformung (max. Absenkung) ergibt. Zusätzlich sollen die maximalen Zugspannungen 250MPa bei einem E-Modul von 210.000MPa nicht überschreiten.

Designvariablen:	$\bar{x} = (b, h)$	Querschnitt
Zielfunktion:	$g(x) = b * h * L \rightarrow \min.$	Volumen
Randbedingungen:	$q_{1,(x)} = \frac{M_b * h}{2 * I} \leq 250 MPa$	Spannung
	$q_{2,(x)} = \frac{F * L^3}{3 * E * I} \leq 50 mm$	Durchbiegung
	$q_{3,(x)} = b < h$	Querschnitt
	$q_{4,(x)} = b \geq 15 mm$	min. Breite

Graphische Lösung:

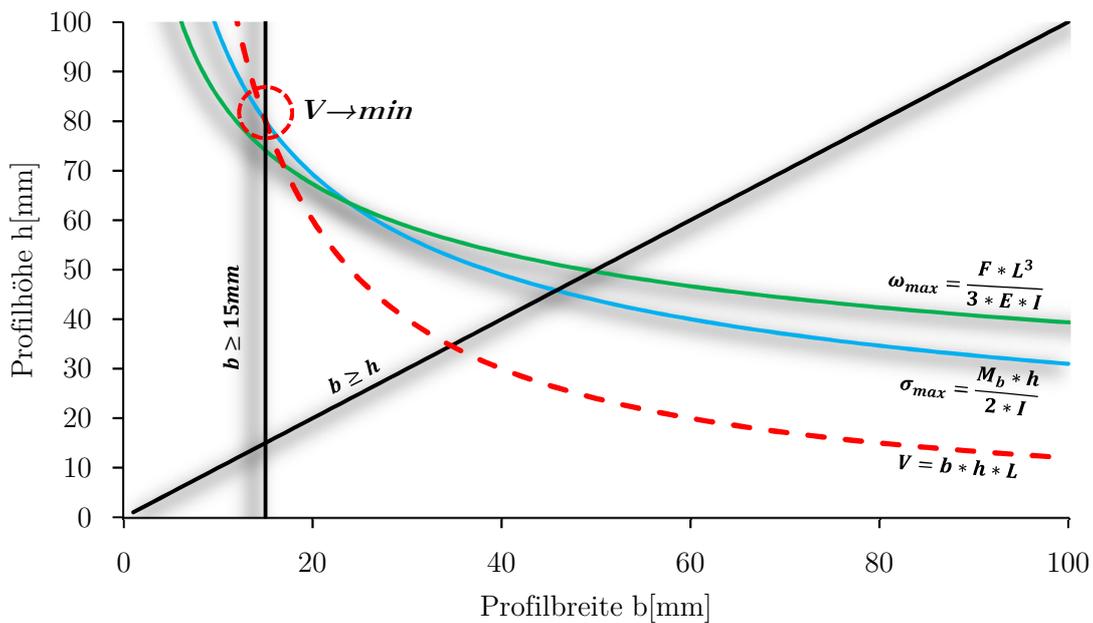


Abb. 3.12: Graphische Lösung des Kragträgers

Die graphische Lösung ergibt einen Querschnitt von $b=15\text{mm}$ und $h=80\text{mm}$. Das resultierende Volumen beträgt bei dieser Kombination $V=2,4\text{dm}^3$ was weiter einem Gewicht von $18,8\text{kg}$ entspricht. Bei einem Werkstoffwechsel von Stahl auf Aluminium würde sich der Querschnitt auf $b=15\text{mm}$ und $h=110\text{mm}$ ändern was weiter zu einem Gewicht von $8,9\text{kg}$ führt. Bei einer Konstruktion aus Holz müsste dieser Balken einen Querschnitt von $b=15\text{mm}$ und $h=190\text{mm}$ aufweisen ($m=2,9\text{kg}$) um dieselbe Belastung bei denselben Randbedingungen aufnehmen zu können. Tragwerkskonstruktionen aus Holz mit einem großen Aspektverhältnis sind z.B. in der Dachkonstruktion von Reithallen o.Ä. zu finden. Ein zusätzlicher Aspekt ist, dass nur die Höhe und Breite des Balkens für die Optimierung herangezogen wird, nicht jedoch die Masseverteilung oder die Form. Würde diese mit einbezogen werden, wäre ein Träger mit ein I-Profil die günstigste und optimalere Lösung für dieses zuvor graphisch gelöste Problem. Grund

hierfür ist eine deutliche Materialanhäufung an weit entfernten Bereichen (ausgehend von der neutralen Faser) was zu einer deutlichen Erhöhung des Flächenträgheitsmomentes des Querschnitts und somit zu einer Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des Trägers gegen diese Belastung führt. Auf diese Weise, durch die Verwendung von speziellen Profilen, werden für unterschiedlichste Belastungsarten wie Zug/Druck, Biegung oder Torsion optimale Querschnittsgeometrien vordefiniert. Einfachere Problemstellungen lassen sich auf diesem Wege schnell und unkompliziert lösen. Sollen jedoch ganze Volumenstrukturen in topologisch optimierte Strukturen umgewandelt werden, ist dies über dem graphischen Wege nicht mehr möglich. Hierfür bietet die FEO, die auf den Grundprinzipien der FEM basiert, eine adäquate Lösung. Bei der FEO wird, analog zur FEM, das gesamte Bauteil in finite Elemente eingeteilt. Für jedes dieser Elemente wird ein Gleichungssystem (Anzahl der Gleichungen ist abhängig von der Anzahl der Knoten im Element) aufgestellt und gelöst.

3.3.2 Numerische Optimierung

Die Finite Elemente Methode (FEM) basiert auf der Berechnung von Verschiebungen und/oder Kräften (Gl. 3.15). Das zugehörige Gleichungssystem wird mit der Hilfe von sog. Solvern mathematisch verarbeitet um die jeweiligen Unbekannten zu bestimmen.

$$K_{ij} * u_i = F_j \quad \text{Gl. 3.15}$$

In diesem mathematischen Zusammenhang sind u die Verschiebungen, F die Kräfte und K die globale Steifigkeitsmatrix. Sind die Verschiebungen einer Struktur bestimmt, wird über Materialmodelle die zugehörigen Spannungen berechnet werden. Das einfachste Materialmodell wurde von Robert Hooke im Jahre 1678 erstmals publiziert. [129] Es beschreibt das linear-elastische Verhalten von Körpern unter Krafteinwirkung und ist nach Gl. 3.16 definiert.

$$F = D * \Delta l \quad \text{Gl. 3.16}$$

Hierbei stellt F die Kraft, D eine Proportionalitätskonstante und Δl die Dehnung dar. Ein direkter Schluss aus diesem Zusammenhang ist, dass eine in einem elastischen System wirkende Kraft proportional der auftretenden Dehnung ist.

3.3.3 Das Hook'sche Gesetz

Heute wird das Hook'sche Elastizitätsgesetz vorwiegend durch eine lineare Tensorgleichung beschrieben (Gl. 3.17). Es ist das einfachste Werkstoffmodell und wird für die Beschreibung einer linear-elastischen Deformation eingesetzt. Sollen im linear-elastischen Zustand Temperatureffekte und Eigenspannungen berücksichtigt werden, kann das Grundmodell um die jeweiligen Terme erweitert werden. Schlussendlich ergibt sich ein formaler Zusammenhang mit dem sich elastische Vorgänge berechnen lassen.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * (\epsilon_{kl} - \alpha_{kl}\Delta T) + \sigma_{ij}^E \quad \text{Gl. 3.17}$$

Neben dem allgemeinen Werkstoffverhalten muss weiter nach der Richtungsabhängigkeit unterschieden werden. So sind isotrope, orthotrope und anisotrope Werkstoffe häufig in der Technik vorzufinden.

3.3.3.1 Isotropes Werkstoffverhalten

Wie bereits beschrieben ist ein isotroper Werkstoff durch identische Materialeigenschaften in alle Raumrichtungen definiert was in einem einfachen Aufbau der Proportionalitätsmatrix C_{ijkl} resultiert. Nach Gl. 3.17 würde für den Fall des isotropen Hook'schen Gesetzes die vollständige Schreibweise folgende Form annehmen. Zusätzlich sind die Normalspannungen von den Schubspannungen entkoppelt [105].

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} * \left[\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T \right] + \begin{pmatrix} \sigma_x^E \\ \sigma_y^E \\ \sigma_z^E \\ \tau_{xy}^E \\ \tau_{yz}^E \\ \tau_{zx}^E \end{pmatrix}$$

3.3.3.2 Orthotropes Werkstoffverhalten

Ein orthotroper Werkstoff zeichnet sich dadurch aus, dass nur entlang der Hauptrichtungen (x, y, z od. 1, 2, 3) gleiche Materialeigenschaften vorliegen. Entlang der Diagonalrichtung zeigen sie deutliche Unterschiede hinsichtlich des Deformationsverhaltens. Im Vergleich zum isotropen Werkstoffverhalten steigt die Zahl der

Unbekannten von zwei (E, ν) auf neun ($C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66}, C_{12}, C_{13}, C_{23}$) Unbekannte beim orthotropen Material die bestimmt werden müssen. [105]

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_x^E \\ \sigma_y^E \\ \sigma_z^E \\ \tau_{xy}^E \\ \tau_{yz}^E \\ \tau_{zx}^E \end{pmatrix}$$

3.3.3.3 Anisotropes Werkstoffverhalten

Die letzte Gruppe von Werkstoffen sind die vollkommen anisotropen Materialien. Diese besitzen in jeder Raumrichtung unterschiedliche Werkstoffparameter und damit auch unterschiedliches Werkstoffverhalten. Hierbei ist die gesamte Elastizitätsmatrix unbekannt und es sind somit 21 Unbekannte zu bestimmen um dieses Materialverhalten abbilden zu können. Im Gegensatz zum isotropen und anisotropen Modell ist eine Kopplung zwischen den Normalspannungen und der durch Schub hervorgerufenen Gleitung erkennbar ($C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{34}, C_{35}, C_{36}$). [105]

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & sym. & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_x^E \\ \sigma_y^E \\ \sigma_z^E \\ \tau_{xy}^E \\ \tau_{yz}^E \\ \tau_{zx}^E \end{pmatrix}$$

3.3.4 Algorithmen für die Optimierung

3.3.4.1 Sensitivitätsanalyse

Mit der Sensitivitätsanalyse wird während des iterativen Fortschreitens der Optimierung die Beziehung zwischen den Designvariablen und den Responseparametern überprüft. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die eingangs definierten Designvariablen jederzeit in direkter oder indirekter Beziehung zu den Responseparametern stehen, da sonst keine Konvergenz der Zielfunktion bzw. kein sinnvolles Zieldesign generiert werden kann. Die Sensitivitätsanalyse wird nach jedem Iterationsschritt durchgeführt und bildet schlussendlich ein Abbruchkriterium. Der in Hyperworks verwendete formale Zusammenhang zwischen der Designvariablen und den jeweiligen Responseparametern ist nach Gl. 3.18 bis Gl. 3.20 definiert.

$$K * u = f \quad \text{Gl. 3.18}$$

Die Sensitivität bzw. der Gradient des Responseparameters f wird über

$$\frac{\partial K}{\partial x} u + K \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} \quad \text{Gl. 3.19}$$

bestimmt wobei u die Verschiebung, K die Steifigkeit und x die Designvariable darstellt. Daraus kann z.B. direkt die Sensitivität des Verschiebungsvektors $\frac{\partial u}{\partial x}$ bestimmt werden.

$$K \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial K}{\partial x} u \quad \text{Gl. 3.20}$$

3.3.4.2 SIMP – Solid Isotropic Material with Penalisation

Die SIMP Methode (Gl. 3.21) basiert auf der lokalen Variation des Elastizitätsmoduls. Im ersten Schritt werden die lokalen Spannungen (Verschiebungen, Kräfte) analysiert und ausgewertet.

$$\underline{K}_{(\rho)} = \rho^p K \quad \text{Gl. 3.21}$$

Im Anschluss wird aufgrund der jeweiligen lokalen Belastung ein Dichtefeld generiert, dass die Belastungsintensität widerspiegelt. Dieses Dichtefeld bestimmt in weiterer Folge den lokalen Elastizitätsmodul sodass Bereiche mit hohen Belastungen verstärkt werden (\rightarrow Material bleibt erhalten, $\rho = 100\%$) und Bereiche mit keiner Belastung verschwinden (\rightarrow Material wird in diesen Bereichen weggenommen, $\rho = 0\%$). Bereiche mit normaler Belastung werden im Zuge der Iterationsschritte so lange angepasst, bis die Belastung im resultierenden Restquerschnitt gleichmäßig aber unter einem definierten kritischen Grenzwert liegt. Daraus ergibt sich schlussendlich eine wurzelartige Struktur die den Spannungspfaden folgt und weitgehend eine konstante Spannung im Querschnitt aufweist.

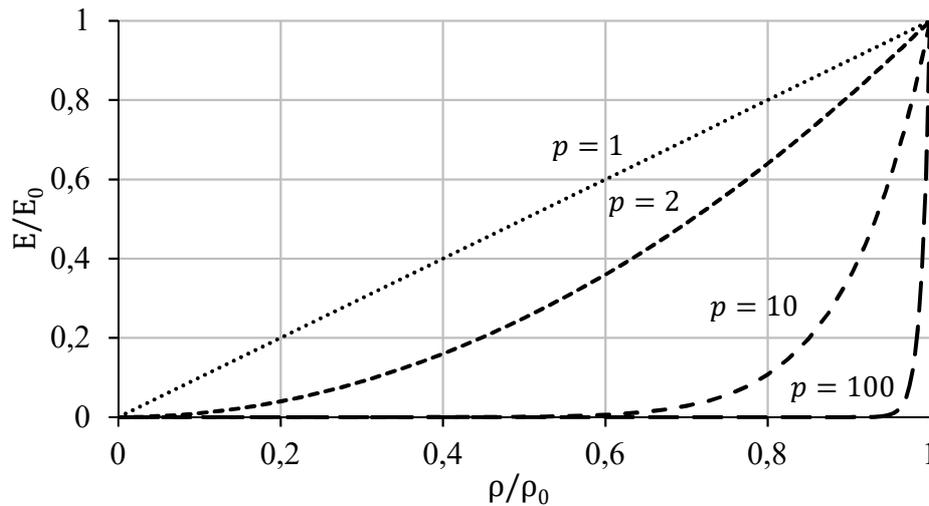


Abb. 3.13: Einfluss des P-Exponenten auf die Dichtesensitivität

3.3.4.3 Normierte Zellspannung in Gitterstrukturen

Neben der Berechnung des Elastizitätsmoduls der Zelle ist auch die Berechnung der resultierenden Zellspannung erforderlich. Die resultierende Zellspannung wird über die betroffenen Zellknoten nach Gl. 3.22 gemittelt.

$$\sigma_N = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_i}{\sigma} \right)^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad \text{Gl. 3.22}$$

Diese Ansätze bieten die Möglichkeit Gitterstrukturen und deren Anwendung im Entwicklungsprozess von Bauteilen zu integrieren. Neben den beschriebenen Vorteilen beinhaltet dieses Vorgehen auch einen großen Nachteil. Die generierten Gitter- oder Fachwerkstrukturen sind streng vom zuvor generierten FEM-Netz abhängig. Stäbe können nur innerhalb einer Zelle und zwischen zwei Elementknoten generiert werden. Somit sind nur netzabhängige (inkl. Spannungsrandbedingung) und nicht belastungsabhängige Gitterstrukturen möglich (Abb. 5).

3.3.5 Topographieoptimierung (2D)

Die Topographieoptimierung basiert auf der lokalen Verschiebung von Knoten normal zur Oberfläche. Der verwendete Algorithmus maximiert durch die Strukturierung der Oberflächenknoten den Widerstand gegen eine vordefinierte Belastung. Die Strukturierung erfolgt durch Hinzufügen von Sicken und ähnlichen Versteifungen [12,

60]. Ein wesentlicher Vorteil dieser Optimierungsmethode ist die Entwicklung leichter und steifer Blechbauteile aus einem bestimmten Werkstoff bei gleichem Werkstoffverbrauch.

3.3.6 Topologieoptimierung (2D/3D)

Die Topologieoptimierung stellt auch eine wichtige Methode dar um Leichtbauaspekte in die Entwicklung neuer Bauteile einfließen zu lassen. Im Vergleich zur Topographieoptimierung erzeugt die Topologieoptimierung leichte und steife „voluminöse“ wurzel- oder netzartige Strukturen.[1, 18, 20] Die Grundfunktionalität der Topologieoptimierung beruht auf der Lokalisierung belasteter Bereiche und der anschließenden Generierung von Streben mit einer nahezu konstanten Spannungsverteilung über den jeweiligen Strebenquerschnitt. Über Optimierungsparameter kann die Geometrie der resultierenden Wurzelstruktur beeinflusst werden. Hierfür können maximale und minimale Durchmesser sowie definierte Abstände oder Symmetrien vordefiniert werden. Zusätzlich zu diesen direkten geometrischen Parametern, lassen sich auch indirekt Werkstoffeigenschaften wie z.B. eine zulässige Spannung oder eine optimale Wärmeleitung berücksichtigt. Drückt man die Wirkung der Topologieoptimierung auf ein Bauteil über die Materialeffizienz ξ , also die effektive Ausnützung des vorhandenen Werkstoffvolumens aus, so führt eine Optimierung der Topologie zu einer Erhöhung der Materialeffizienz.

3.3.7 Größen- und Formoptimierung (3D)

Eine weitere Optimierungsmethode ist die Größen- und Formoptimierung. Diese Methode optimiert Geometrien durch die Verschiebung von Oberflächenknoten. Die Formoptimierung dient dazu kritische Bereiche mit hohen Belastungen zu entschärfen [19]. Häufig wird diese Optimierungsmethode nach einer Topologieoptimierung durchgeführt. [20, 21]

3.3.8 Optimierung durch Gitterstrukturen (3D)

Die automatisierte Generierung von Gitterstrukturen ist eine neue Technologie zur Implementierung von zusätzlichen Leichtbaueigenschaften. Die grundlegende Funktionsweise basiert auf der Substituierung der optimierten Geometrie durch ein fein strukturiertes Fachwerk. Im verwendeten Softwarepaket von Altair, HyperWorks [9],

werden für diese Art der Optimierung unterschiedliche Zellstrukturen angeboten. Enthalten sind tetraedrische, kubische, pyramidale und pentaedrische Zelltypen. Diese Ansätze bieten die Möglichkeit Gitterstrukturen und deren Anwendung im Entwicklungsprozess von Bauteilen zu integrieren. Neben den beschriebenen Vorteilen beinhaltet dieses Vorgehen auch einen großen Nachteil. Die generierten Gitter- oder Fachwerkstrukturen sind streng vom zuvor generierten FEM-Netz abhängig. Verfügbar sind nur Einheitszellen auf der Basis eines hexaedrischen oder tetraedrischen FEM-Netzes. Stäbe können nur innerhalb einer Zelle und zwischen zwei Elementknoten generiert werden. Somit sind nur netzabhängige (inkl. Spannungsrandbedingung) und nicht belastungsabhängige Gitterstrukturen möglich Abb. 3.14.

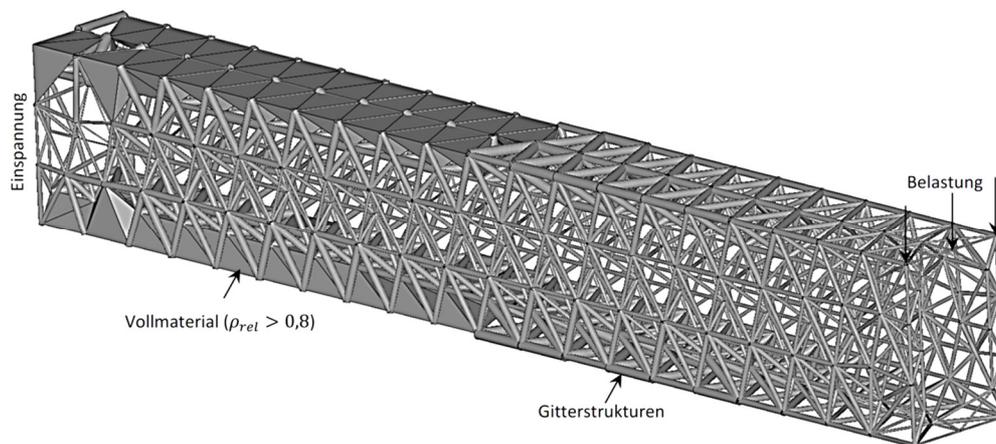


Abb. 3.14: Optimierter Biegeträger mit Gitterstrukturen

Weitere Softwarepakete für die Gitterstrukturoptimierung werden von Autodesk [10] oder Materialise [115] angeboten. Aktuell nutzt speziell die Medizinindustrie diese Technologie um poröse und strukturierte Oberflächen auf Implantaten zu erzeugen um dadurch den Heilungsprozess zu beschleunigen. Somit bietet die Gitteroptimierung ein zukunftsicheres Anwendungsgebiet für die additive Fertigung – die Generierung von komplexen, sehr feinen und irregulären Strukturen.

3.3.9 Optimierungsparameter

Jede Optimierungstechnologie benötigt spezifische Parameter um wirksam durchgeführt werden zu können. Im fortschreitenden Entwicklungsprozess bedeutet dies, dass man die finalen Funktionen des Bauteiles festlegt.

Tab. 3.4: Optimierungsparameter

Nr.	METHODE	ANWENDUNGSBEREICH	OPTIMIERUNGSPARAMETER
1	Topologie-optimierung	<ul style="list-style-type: none"> voluminöse Bauteile und Bleche die Rauheit ist abhängig von der verwendeten Netzfeinheit (hex/quad vs. tet/tria) Nachbearbeitung notwendig bietet Designvorschläge für die Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> Volumenanteil, Massenanteil Nachgiebigkeit, Steifigkeit Versatz Spannung, Dehnung Schädigung ...
2	Topographie-optimierung	<ul style="list-style-type: none"> nur Blechbauteil Erhöhung des Widerstandes gegen Belastungen vorwiegend nur für Nichtfunktionsflächen (Sicken) Steifigkeitserhöhung ohne Materialzugabe 	<ul style="list-style-type: none"> lokale oder globale Spannung und Dehnung Symmetrie (1-Ebene, 2-Ebenen, zyklisch, ...) Breite und Länge von Sicken
3	Form-optimierung	<ul style="list-style-type: none"> Oberflächenknoten von Volumenbauteilen spannungs- und belastungsbedingte Anpassung der Oberfläche Reduktion von Spannungen in kritischen Bereichen gut für stufenweise Geometrieübergänge nutzbar 	<ul style="list-style-type: none"> lokale Spannung oder Dehnung Kerbspannung Anwendung von Parameterbereichen (Obere und untere Grenzwerte für Parameter)
4	Größen-optimierung	<ul style="list-style-type: none"> dünnwandige Bauteile und Verbundwerkstoffe Optimierung der Layerdicke spannungsabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> Spannung, Dehnung Layerdicke Komposit-Layerdicke Eigenfrequenz
5	Gitterstruktur-optimierung	<ul style="list-style-type: none"> voluminöse Körper netzabhängige Entwicklung von Gitterstrukturen gut für die Implementierung von Leichtbauaspekten beliebige Zelltypen möglich offene oder geschlossene Zellen möglich strukturiert → Gitter nicht strukturiert → Schaum 	<ul style="list-style-type: none"> Spannungsabhängigkeit Strebendicke Netzgröße (Zellgröße = Elementgröße) Elementtyp (hex/quad vs. tet/tria) relative Dichte (oberer und unterer Grenzwert) Schärfe der Dichteverteilung (P-Wert → high, med, low) Schärfe der normierten Zellspannung (k-Wert)

Fasst man alle Überlegungen hinsichtlich Optimierungsparameter für jede Optimierungstechnologie zusammen erhält man eine übersichtliche Darstellung über die Optimierungsmöglichkeiten, Potentiale und vor allem aber auch Grenzen der Optimierung. Tab. 3.4 zeigt die grundlegenden Optimierungsparameter für unterschiedliche Optimierungsvarianten.

3.4 Eigenschaften von Gitterstrukturen

3.4.1 Mechanische Eigenschaften nach Ashby

Nach Ashby werden die mechanischen Eigenschaften von Gitterstrukturen anhand einer Einheitszelle des Gitterverbundes bestimmt. Basis ist eine von M. Ashby und L. Gibson [100] entwickelte Methode um reguläre und irreguläre Strukturen mathematisch und mechanisch zu erfassen (Gl. 3.23). Zelluläre Strukturen werden für die Anwendung im konstruktiven Leichtbau verwendet. Der Leichtbau zielt im Allgemeinen drauf ab, das Gewicht des Bauteils oder der Konstruktion, zu minimieren jedoch bei einer gleichbleibenden oder verbesserten Steifigkeit. Das Ziel ist demnach das verwendete Material dort einzusetzen, wo es für die Funktionserfüllung benötigt wird. Die zellulären Strukturen bieten die Möglichkeit unbelastete Bereiche im Bauteil mit geringem Materialeinsatz zu füllen. Zusätzlich können belastete solide Bereiche durch speziell optimierte Gitterstrukturen (Variable Stabendurchmesser oder gradierte relative Dichte) materialschonend aufgebaut werden.

$$\frac{X}{X_0} = n * \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^p \quad \text{Gl. 3.23}$$

In Gl. 3.23 stellt X eine beliebige Eigenschaft des Werkstoffes, wie z.B. den Elastizitätsmodul oder die Streckgrenze, dar. X_0 steht für den Ausgangswert der jeweiligen Eigenschaft der am Vollwerkstoff bestimmt wird. $\frac{\rho}{\rho_0}$ steht weiter für die jeweilige relative Dichte der betrachteten zellulären Struktur. Die Werte n und p sind Korrelationsfaktoren die über Versuche oder auf analytischem Wege bestimmt werden können. Ashby definierte weiter belastungsabhängige p -Werte. So können die elastischen und plastischen Kenngrößen wie z.B. Elastizitätsmodul E , Poisson Zahl ν oder der Plateauspannung σ_{pl} von zellulären Strukturen, in Abhängigkeit von der relativen Dichte, bestimmt werden. [109, 110, 112]

Damit Gitterstrukturen tragende Funktionen übernehmen können, müssen die elastischen (Elastizitätsmodul und Querkontraktion) und plastischen Eigenschaften (Plateauspannung) der jeweiligen Struktur bekannt sein. Der allgemeine Weg ist die Identifizierung einer Einheitszelle im Gitterverbund. Diese Einheitszelle wird weiter

untersucht um ein repräsentatives Segment, dass für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften herangezogen wird, zu finden. Für irreguläre stochastische Strukturen bieten Modelle wie das Aboav-Weaire Gesetz oder das Lewis Gesetz die Möglichkeit die scheinbar irreguläre und zufällige Anordnung von Streben oder Zellwänden statistisch zu beschreiben, was die Grundlage bietet um diese charakteristischen Substrukturen zu identifizieren. Im Anschluss wird das Verhalten der Einheitszelle oder des repräsentativen Segments untersucht um den, bei einer gegebenen Belastung, vorherrschenden Deformationsmechanismus zu bestimmen.

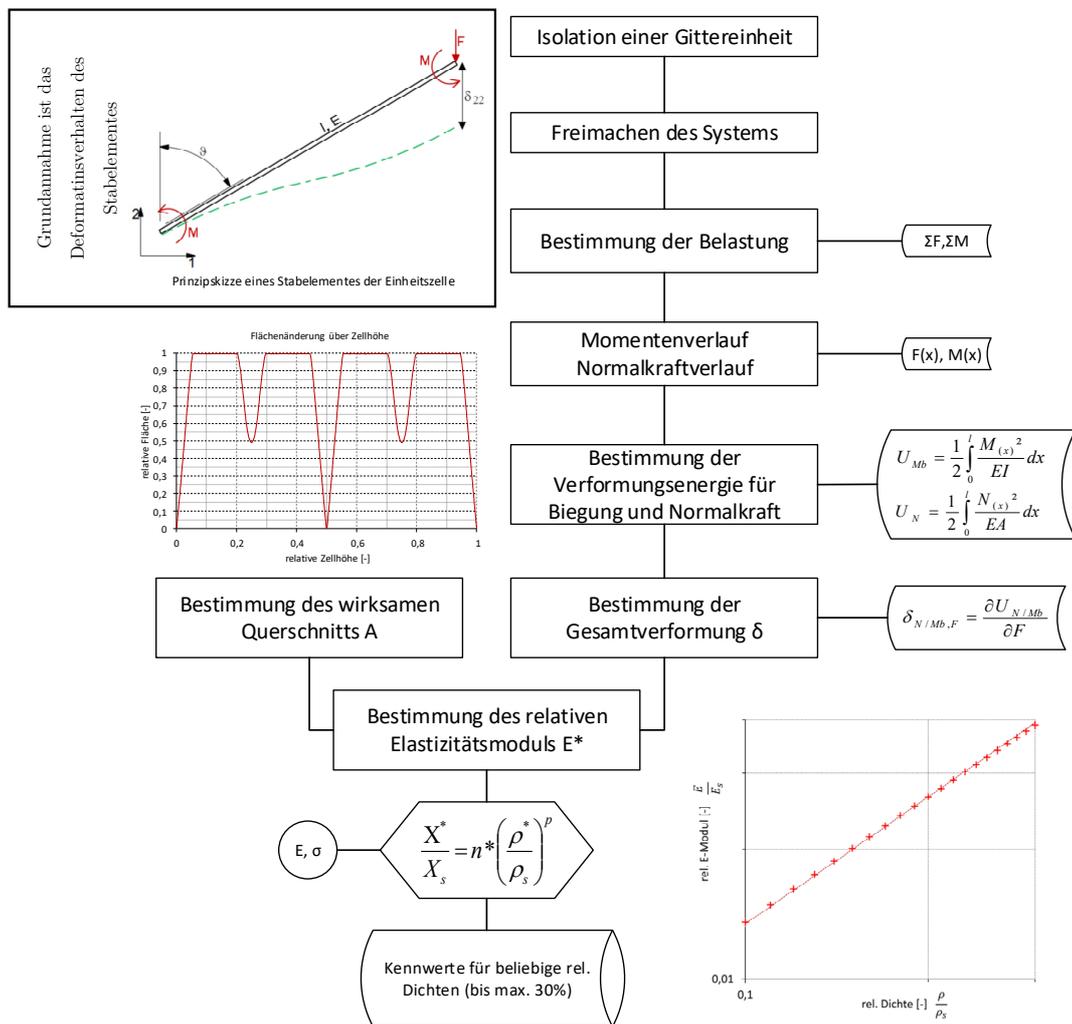


Abb. 3.15: Berechnungsschema für die Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Gitterstrukturen nach M. Ashby

Nach der Bestimmung des Verformungsmechanismus werden die Gleichgewichtsbeziehungen unter der Annahme einer beliebigen Kraft (i.d.R. Kompressionskraft) aufgestellt und die allgemeinen Kraft- ($N(x), Q(x)$) und Momentenverläufe ($M(x)$) bestimmt. Mit deren Hilfe kann über das Prinzip der virtuellen

Arbeit und dem daraus resultierenden Satz von Castigliano, die Verschiebung der Struktur entlang der virtuellen Kraft bestimmt werden. Diese Verschiebung oder Verformung wird schlussendlich für die Bestimmung des (Struktur-)Elastizitätsmoduls herangezogen. Je nach Komplexität der Struktur kann sich das finden einer adäquaten und repräsentativen Substruktur als schwierig erweisen. In der Literatur findet man für die unterschiedlichsten Gitterstrukturen die mathematische Beschreibung der elastischen Eigenschaften (Tab. 3.5) in Abhängigkeit vom Strebendurchmesser d und der Strebenlänge l .

Tab. 3.5: Analytische Berechnung der mech. Eigenschaften von Zellstrukturen.

Typ	Relative Dichte	E-Modul	Poisson Zahl	Streckgrenze	Ref
1	$3\pi\left(\frac{d}{2l}\right)^2 - 8\sqrt{2}\left(\frac{d}{2l}\right)^3$	$\pi\left(\frac{d}{2l}\right)^2$	0	$\pi\left(\frac{d}{2l}\right)^2$	[126]
2	$\frac{36\pi}{(7+\sqrt{5})}\left(\frac{d}{2l}\right)^2 - \frac{12(12.0404)}{(7+\sqrt{5})}\left(\frac{d}{2l}\right)^3$	$\frac{4\pi\left(\frac{d}{2l}\right)^2}{3(\sqrt{2}+1)}C_{GS,1}$	$\frac{1}{3}C_{GS,2}$	$\frac{4\pi}{(\sqrt{2}+1)^2}\left(\frac{d}{2l}\right)^2$	[127]
3	$\frac{15\pi}{(1+\sqrt{2})^3}\left(\frac{d}{2l}\right)^2$	$\frac{2\pi}{\sqrt{2}+1}\left(\frac{d}{2l}\right)^2 \frac{1+9\left(\frac{d}{2l}\right)^2}{5+21\left(\frac{d}{2l}\right)^2}$	$\frac{1-3\left(\frac{d}{2l}\right)^2}{5+21\left(\frac{d}{2l}\right)^2}$	$\frac{\pi}{(\sqrt{2}+1)^2}\left(\frac{d}{2l}\right)^2$	[126]
4	$3\sqrt{2}\pi\left(\frac{d}{2l}\right)^2 - 21.85612\left(\frac{d}{2l}\right)^3$	$\frac{\sqrt{2}A(A l^2 + 36l)}{3l^2(A l^2 + 4l)}$	$-\frac{-A l^2 + 12l}{3A l^2 + 4l}$	$\frac{2\sqrt{2}A}{l}C_3$	[128]
5	$\frac{3\sqrt{3}}{2}\pi\left(\frac{d}{2l}\right)^2 - \frac{27\sqrt{2}}{4}\pi\left(\frac{d}{2l}\right)^3$	$\frac{E_1}{E_s} = \frac{E_2}{E_s} = \frac{27 \frac{\sin\theta}{\sin 2\theta}}{3l^4 + \frac{18l^2}{\pi(d/2)^4 + \pi(d/2)^2}}$ $\frac{E_3}{E_s} = 9\pi\left(\frac{d}{2}\right)^4 \frac{\cos\theta}{2l^4 \sin^2\theta}$	$\nu_{13} = 0$ $\nu_{31} = \nu_{32} = 0$ $\nu_{12} = 1$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{ys}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_{ys}} = \frac{3\sqrt{6}}{8}\left(\frac{b}{l}\right)^3$	[58, 125]
6	$4\pi\sqrt{3}\left(\frac{d}{2l}\right)^2$	$\frac{4\sqrt{3}}{\frac{1}{\pi}\left(\frac{2l}{d}\right)^2 + \frac{1}{2\pi}\left(\frac{2l}{d}\right)^4}$	$-\frac{1}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} + \frac{l^2}{4\pi\left(\frac{d}{2}\right)^4}$ $\frac{1}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} + \frac{l^2}{2\pi\left(\frac{d}{2}\right)^4}$	$\frac{32\sqrt{2}}{3}\left(\frac{d}{2l}\right)^3$	[41]

1...Kubus, 2...Rhombicuboktaeder, 3...verzweigter Kubus, 4...Oktaeder, 5...Rhombicub Dodekaeder, 6...Kubisch raumzentriert

Wie bereits beschrieben, leiten M. Ashby und L. Gibson [99, 100, 108, 113] den Zusammenhang der mechanischen Eigenschaften von den Materialeigenschaften des Grundwerkstoffes und der relativen Dichte der Struktur ab. Ergebnis ist ein Potenzansatz (Gl. 3.23) der über zwei Parameter, n und p , unterschiedlichste Zusammenhänge abbildet. Aus Tab. 3.5 ist jedoch ersichtlich, dass sich bei komplexeren Zellstrukturen, die Eigenschaften nicht nur über diesen Potenzansatz mit den zwei Parametern beschreiben lässt. So werden z.B. für einen Rhombicuboktaeder sehr abstrakte analytische Zusammenhänge abgeleitet.

Auf dieser Grundlage wird, für die weitere Verwendung der Gitterstrukturen und deren Auslegung, ein handliches Matlab Programm (LPCalcV0.1) erstellt. Mit dessen Hilfe können die Gitterstrukturen für spezielle Anwendungen charakterisiert, berechnet und erzeugt (STL → für AM, BDF → für FEM) werden.

3.4.2 Das Aboav-Weaire Gesetz

Durch das Gesetz nach Aboav-Weaire (Gl. 3.24) [31, 32] wird ein Zusammenhang zwischen der Geometrie von Polygonen (2D) oder Prismen (3D) zu seinen Nachbarzellen hergestellt. Jede Art von zellulären Strukturen besitzt im Mittel eine definierte Anzahl von Kanten pro Zelle. Ist die Anzahl der Kanten einer betrachteten Zelle größer als das bevorzugte Mittel so tendieren die Nachbarzellen dazu weniger Zellkanten aufzuweisen. Umgekehrt bedeutet dies, dass Zellen mit einer unterdurchschnittlichen Kantenzahl stets von Zellen mit mehr Kanten umgeben sind. Statistisch betrachtet besitzt die Gesamtheit aller Zellen im Mittel die bevorzugte Kantenzahl [30–37, 61, 146]. Gl. 3.24 beschreibt diesen zweidimensionalen Zusammenhang.

$$m_z = a_{2D} + \frac{b_{2D}}{n_z} = 5 + \frac{8}{n_z} \quad \text{Gl. 3.24}$$

Hierbei stellt n die Anzahl der Kanten der betrachteten Zelle und m_n die durchschnittliche Anzahl der Kanten der Nachbarzellen dar. Die Konstanten a und b werden für 2D Strukturen mit 5 und 8 angegeben. [31] Für den dreidimensionalen Aufbau von Strukturen konnte die Beziehung nach Gl. 3.25 bestimmt werden.

$$m_f = a_{3D} + \frac{b_{3D}}{n_f} = 13 + \frac{14}{n_f} \quad \text{Gl. 3.25}$$

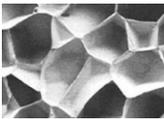
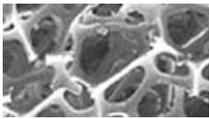
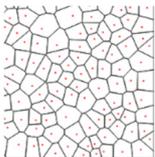
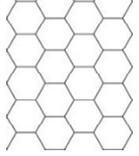
Für ein räumlich aufgebautes Netzwerk an zellulären Strukturen werden für die Konstanten a und b die werte 13 und 14 angegeben. Die Konstanten a und b für den 2D und 3D Fall sind statistische Parameter die sich durch eine vollständige Füllung einer Fläche oder eines Volumens mit einer gegebenen Zellform ergeben. [30–37]

3.4.3 Gitterstrukturen für den Leichtbau

Gitterstrukturen sind in vielfältiger Weise in der Natur und ebenso in der Technik vorzufinden. Als Leichtbauwerkstoff werden Schäume oder reguläre Zellstrukturen für Sandwichpanele oder Verpackungsmaterial verwendet. In der Gießereiindustrie werden offenporige metallische Schäume für das Herausfiltern von Oxiden und groben Partikeln beim Sandguss verwendet. In der analytischen Chemie werden Kartuschen mit einem porösem Material verwendet um eine möglichst große Reaktionsoberfläche zu erhalten und Schwämme besitzen aufgrund ihrer offenen Schaumstruktur die Fähigkeit Wasser zu speichern, um dieses bei der Reinigung von Oberflächen wieder freizugeben. Dies sind einige Beispiele für die technische Anwendung von derartigen Strukturen. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die genaue Definition der Funktionen des Bauteils für die erfolgreiche und effektive Anwendung von zellulären Strukturen.

Neben der reinen Ausnützung der Struktur können zelluläre Strukturen in Kombination mit speziellen Werkstoffen neuen Anwendungsbereichen zugeführt werden. Die Verwendung von Kunststoffen für reguläre offene Gitterstrukturen ergibt ausgezeichnete Vibrations-Dämpfungseigenschaften.

Tab. 3.6: Einteilung von zellulären Strukturen

		geschlossen	offen
			
stochastisch		<ul style="list-style-type: none"> • Schaum (metallisch / organisch) • Zellgewebe • Pflanzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwamm • Knochen • Filter
regulär		<ul style="list-style-type: none"> • Honeycomb • Sandwich • Verpackungsfolie 	<ul style="list-style-type: none"> • Karton • fcc, bcc • rhomb.-dod. • Kelvinzelle

Im Sinne des Leichtbaus lassen sich diese Strukturen nicht nur zur Gewichtsreduktion, sondern auch hinsichtlich Funktionsintegration erfolgreich einsetzen. Das Anwendungsgebiet erstreckt sich hierbei von Haushaltsgeräten bis hin zu tragenden Strukturbauteilen in der Luft- und Raumfahrt [93]. Eine Einteilung dieser technisch

bedeutsamen Strukturtypen ist in Tab. 3.6 dargestellt. O. Rehme [121] unterteilt die für die additive Fertigung relevanten Strukturen grundsätzlich in reguläre und stochastische Gitterstrukturen. Jedoch lässt sich neben dieser Einteilung auch noch zwischen der Zellbeschaffenheit selbst unterscheiden. So kann zusätzlich zwischen offenen und geschlossenen Gitterstrukturen unterschieden werden. Aus diesen insgesamt vier Merkmalen, lassen sich nun unterschiedlichste Kombinationen ableiten und konkreten Strukturen zuordnen. Ausgehend von diesen exemplarischen Beispielen und einem konkreten Anforderungskatalog für technische Bauteile können so die Vorteile von Form, Struktur, Substruktur und Werkstoff kombiniert werden um schlussendlich hochspezialisierte und effektive Bauteile zu entwickeln.

3.4.4 Relevante Gittertypen für die additive Fertigung

Gitterstrukturen treten in verschiedenen unterschiedlichen Formen auf. Neben den primitiven kubischen Zellen sind die bekanntesten Zelltypen die kubisch flächenzentrierte, die kubisch raumzentrierte und die hexagonal dicht gepackte Einheitszelle. Darüber hinaus gibt es weitere unzählige Gitterstrukturen, mit denen ein Volumen gefüllt werden kann. Ein großer Teil davon kann jedoch nicht mit einer Zellgeometrie allein gefüllt werden. Z.B. werden bei der Verwendung von verzweigten Kuben (Abb. 3.16) zusätzlich oktaedrische Zellen benötigt um die Ecken des Kubus auszufüllen.

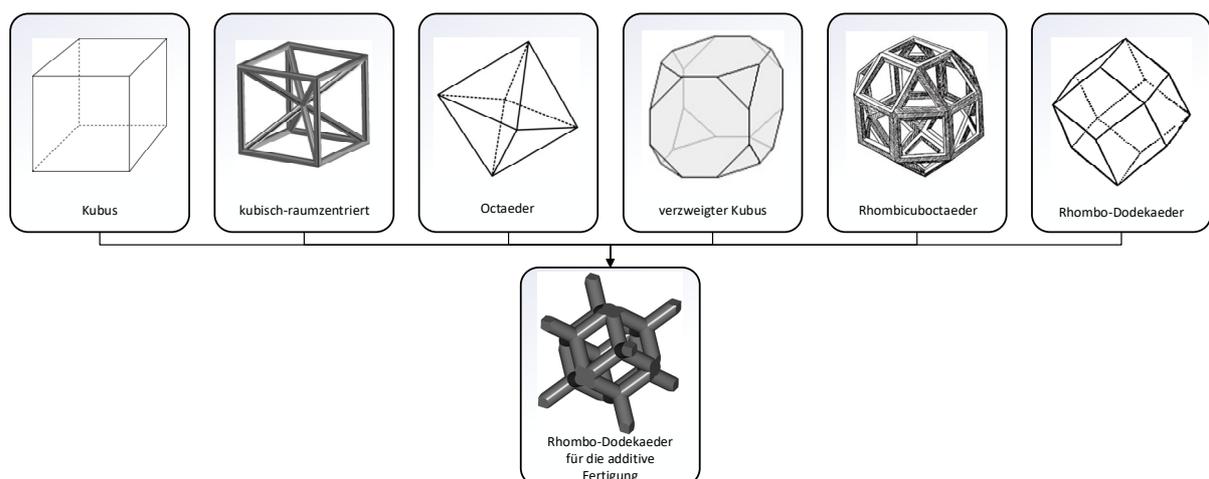


Abb. 3.16: Auszug unterschiedlicher Zelltypen und Evaluierung für die additive Fertigung

Die allgemeine Berechnungsmethode beruht auf der Annahme, dass von einer Einheitszelle ein für den jeweiligen Zelltyp exemplarisches Subsegment herangezogen wird. Für die analytische Bestimmung der mechanischen Kennwerte eines Zelltypenverbundes bedeutet dies, dass i.d.R. kein signifikantes Zellareal gefunden werden kann.

Im Hinblick auf die additive Fertigung lassen sich alle Gittertypen hinsichtlich deren Herstellbarkeit untersuchen. Hierbei ist eine wesentliche Prozessrestriktion der additiven Fertigung ausschlaggebend. Bei den pulverbettbasierten Verfahren zur Herstellung metallischer Bauteile ist eine maximale horizontale Ausprägung oder ein maximaler Überhang von 1mm möglich. Größere horizontale Ausprägungen benötigen zusätzlichen Support um hergestellt werden zu können. Werden für die Herstellung der jeweiligen Gitterstrukturen zusätzliche Supportstrukturen benötigt, ist die maximal mögliche Gewichtsreduktion unter Berücksichtigung einer vollständigen oder teilweisen Entfernbarekeit des Supports genauer zu untersuchen. Die rhombisch-dodekaedrische Einheitszelle eignet sich aufgrund fehlender horizontaler Streben sehr gut für die Anwendung in additiv gefertigten Bauteilen.

3.5 Aluminium als Leichtbauwerkstoff

Aluminium zeichnet sich in der Praxis speziell durch seine niedrige Dichte von $\rho = 2,7 \frac{g}{cm^3}$ aus. Dadurch können leichte Strukturelemente für komplexe Baugruppen hergestellt werden. In der Automobilindustrie wird Aluminium für die Reduktion des Gesamtgewichtes eingesetzt. 1998 umfasste der Anteil an Aluminiumbauteilen in Fahrzeugen ca. 6-10% des Gesamtgewichtes [29]. Reines Aluminium wird im konstruktiven Bereich jedoch selten bis nicht eingesetzt, da die mechanischen Eigenschaften für eine derartige Anwendung unzureichend wären. Stattdessen werden bevorzugt Legierungen mit unterschiedlichen Legierungselementen für die einzelnen Anwendungsgebiete verwendet. Zu diesem Zweck wurden spezielle Legierungssysteme wie z.B. Al-Si und Al-Mg entwickelt und verbessert. Abb. 3.17 zeigt die Einteilungsschemata für Aluminiumguss- und Aluminiumknetlegierungen.

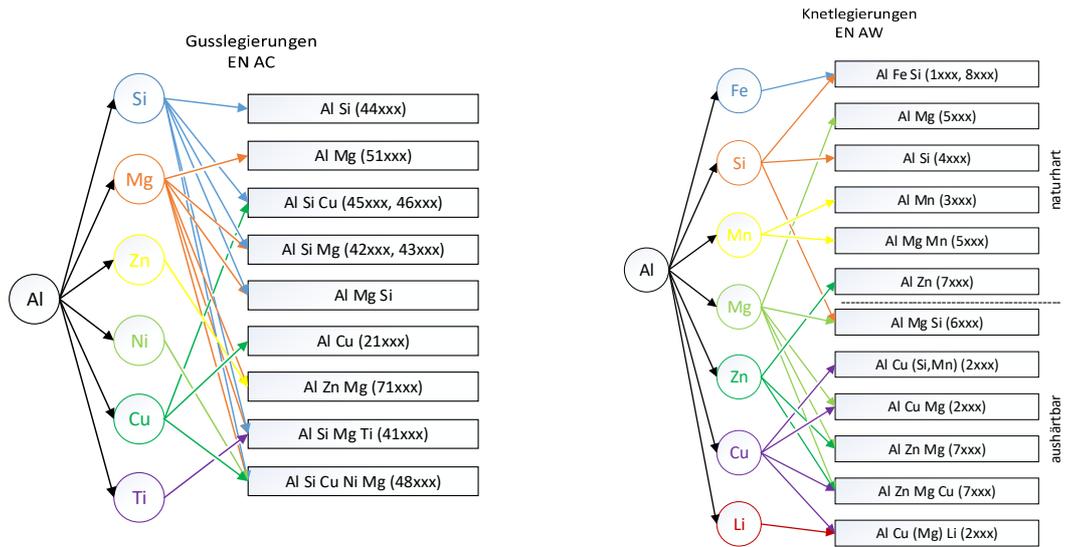


Abb. 3.17: Einteilung der Aluminiumlegierungen [16]

Aluminiumguss- und Aluminiumknetlegierungen werden im Wesentlichen durch ihren Legierungselementanteil unterschieden. Aluminiumgusswerkstoffe weisen Legierungselementanteil von 10 – 12% auf.

Tab. 3.7: Einteilung der Elemente nach ihrer Löslichkeit in Aluminium. E=eutektisch, P=peritektisch, M=monotektisch [57]

System	Type	Löslichkeitsbereich [at-%]				
		<0,1	0,1-1	1-5	5-25	>25
AL-X	E	Be, Y, B, Re, Ca, Vb, Sr, Ba, Sn	Be, Sc, Mn	Si, Cu, Ge	Ga, Li, Mg, Ag	Zn (66,4)
	P	Mo, Nb, Ta, W, Zr	Cr, Hf, V, Ti			
	M	Bi, In, K, Na, Pb, Tl, Cs				

Aluminiumknetlegierungen hingegen liegen im Bereich von 1 – 2% Legierungselemente. Grund für die deutlichen Unterschiede ist, dass bei Knetlegierungen die plastischen Eigenschaften wie z.B. eine gute Umformbarkeit und bei Gusslegierungen die Fließigenschaften und das Formfüllungsvermögen im Vordergrund stehen. Tab. 3.7 gibt eine Übersicht über die maximale Löslichkeit von unterschiedlichen Elementen im festen Aluminium. Dies deckt sich z.B. mit der Zusammensetzung des Al-Si Mischkristalles ($\alpha - MK$), bei dem max. 1,65% Silizium im $\alpha - MK$ gelöst vorliegen [3, 16, 57, 143]. Legierungen wie z.B. AlSi13 werden eutektische Aluminiumlegierungen genannt. Diese Legierungen bieten für Gießprozesse gute Gießvoraussetzungen, da diese aufgrund ihrer

eutektischen Zusammensetzung einen sehr kleinen Erstarrungsbereich aufweisen. Im Gefüge dieser Legierung befinden sich vereinzelt $\alpha - MK$ umgeben von einer Si-Eutektikum Matrix.

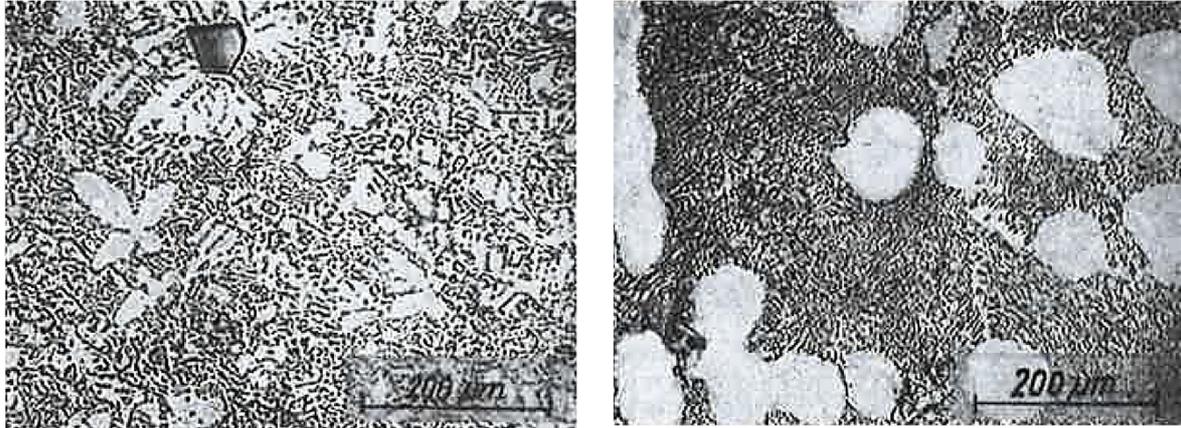


Abb. 3.18: Schlibbilder von AlSi13 (links unveredelt, rechts veredelt mit Natrium) [71]

Im unveredelten Zustand (Abb. 3.18) ist auch deutlich eine Primärsiliziumausscheidung zu erkennen. Die Silizium Primärausscheidung tritt bei allen Aluminiumlegierungen mit einem Siliziumgehalt oberhalb der eutektischen Zusammensetzung von *ca.* 12% auf.

Bei einigen Aluminiumlegierungssystemen besteht die Möglichkeit einer anschließenden festigkeitssteigernden Wärmebehandlung. Industrieller Standard für Aluminiumlegierung ist die sogenannte T6-WBH. Hierfür wird das Bauteil, bestehend aus z.B. *AlSi17Cu4Mg*, im Anschluss an die Fertigung in drei Schritten wärmebehandelt. Am Beginn steht das Lösungsglühen bei 495 bis 505°C für 7 bis 10h. Nach dem Lösungsglühen erfolgt das Abschrecken in Wasser auf Raumtemperatur. Abschließend wird das Bauteil bei 165 bis 185°C und 7 bis 10h warm ausgelagert um die mechanischen Endwerte einzustellen [78, 79].

Ein weiteres Beispiel ist die Legierung *AlSi10Mg*. Hierbei wird nach der Umformung das Bauteil bei *ca.* 170°C warm ausgelagert um ein Ausscheiden von fein verteilten Mg_2Si Partikeln im $\alpha - MK$ zu erreichen [59, 143].

Die Festigkeiten gängiger Aluminiumlegierungen für den Maschinenbau [57] schwanken im Bereich von *ca.* 400 bis 600MPa. Im Gegenzug variiert die Bruchdehnung von 2 bis 12%. Somit wird deutlich, dass für jeden Einsatz ein geeignetes Legierungssystem bestimmt werden muss. Einige lassen sich wärmebehandeln um bessere Festigkeiten zu erhalten und andere besitzen im Grundzustand die benötigten mechanischen und elektrischen Eigenschaften.

3.5.1 Reines Aluminium (>99,5%)

Aluminium erstarrt mit einem kubisch flächenzentrierten (kfz) Kristallgitter (Abb. 3.19), besitzt einen Elastizitätsmodul von 66GPa und einen Schmelzpunkt von 660°C. Von technisch reinem Aluminium wird ab einem Reinheitsgrad von 99,5% gesprochen. Darüber gibt es weitere Reinheitsklassen wie hochrein, höchstrein oder extrem rein.

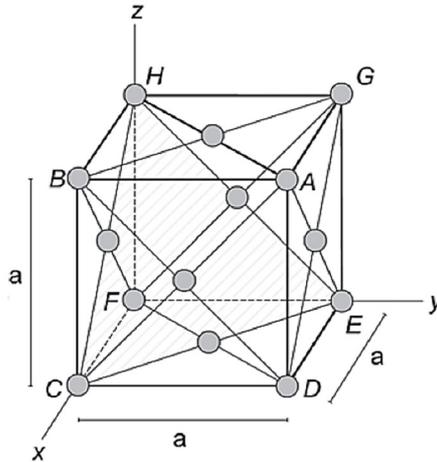


Abb. 3.19: kubisch flächenzentriertes Kristallgitter - Aluminium [16, 55]

Die Anwendungsgebiete von reinem (99 – 99,9%) oder höchst reinem (99,95 – 99,995%) Aluminium liegen im Bereich der Elektro-, Halbleiter- und Kryotechnik. Die guten physikalischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit erweisen sich für die genannten Gebiete als sehr vorteilhaft.

Tab. 3.8: Ausgewählte physikalische Eigenschaften von Aluminium [16, 55]

physikalische Eigenschaften von Aluminium (99,99%)		
Stapelfehlerenergie γ	$200 * 10^7$	$\frac{J}{cm^2}$
Dichte ρ	2,69	$\frac{g}{cm^3}$
Elastizitätsmodul E	66,6	GPa
Schubmodul G	25	GPa
Poisson Zahl ν	0,35	–
Schmelztemperatur T_s	660	°C
spez. Wärmekapazität $c_{p,20^\circ C}$	0,89	$\frac{kJ}{kgK}$
elektrische Leitfähigkeit χ	37,67	$\frac{m}{\Omega mm^2}$
Wärmeleitfähigkeit λ	235	$\frac{W}{mK}$
Hall-Petch Koeffizient K_y	68	$MPa\sqrt{m}$

Tab. 3.8 zeigt einen Überblick über die physikalischen Eigenschaften von Reinaluminium. [16] Die gute Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 235 \frac{W}{mK}$ wird u.a. bei Wärmetauschern oder bei der Kühlung elektrischer Komponenten ausgenutzt. Rohre mit speziellen Rippen erhöhen die Wirkfläche von Kühlkomponenten wodurch ein sehr guter Wärmeübergang gewährleistet ist. [16] Für elektrische Leiter werden neben reinem Aluminium auch spezielle Aluminiumlegierungen eingesetzt. Die elektrische Leitfähigkeit von Rein- und Reinstaluminium liegt im Bereich von 34 bis $38 \frac{m}{\Omega mm^2}$ [16].

3.5.2 Al-Si Legierungssystem

Das Aluminium-Silizium-Legierungssystem (Abb. 3.20) wird am häufigsten verwendet. Grund dafür sind die Eigenschaften des Eutektikums. Das Legierungssystem besitzt im naheeutektischen Bereich eine hervorragende Fließbarkeit und kann mit unterschiedlichsten Elementen legiert und somit für eine bestimmte Anwendung angepasst werden. Das Aluminium bildet mit ca. 12% Silizium ein Eutektikum (Abb. 3.21). Dieses Eutektikum zeigt durch seine, je nach Abkühldauer, feine Struktur gute mechanische Eigenschaften. Weiters wird zwischen untereutektischen und übereutektischen Legierungssystemen unterschieden. Untereutektische Legierungen bilden während der Erstarrung den bereits beschriebenen $\alpha - MK$. Bei der eutektischen Temperatur von $577^\circ C$ erstarrt die Restschmelze schlagartig mit der eutektischen Zusammensetzung. Somit ergibt sich im Schliffbild ein Gefüge, bestehend aus $\alpha - MK$ eingebettet im Si-Eutektikum.

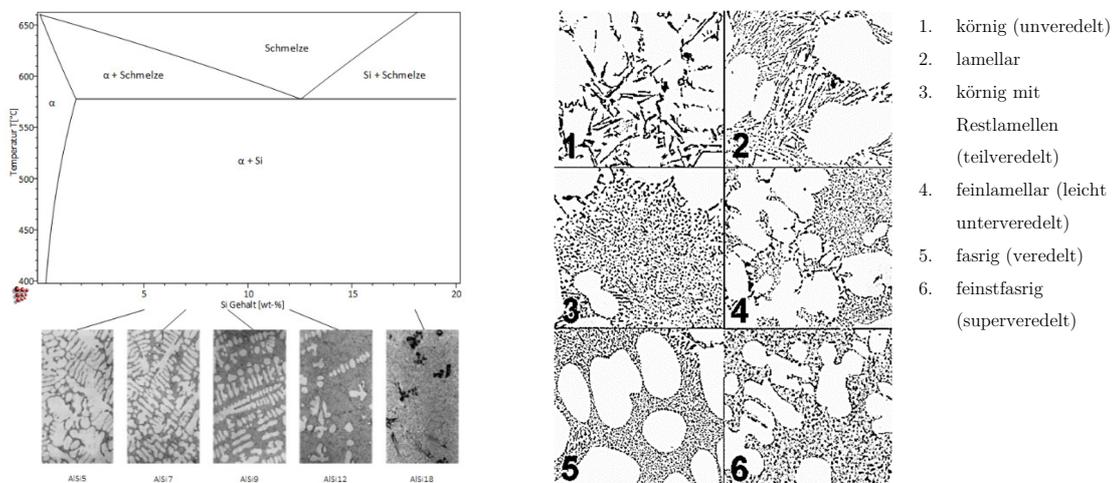


Abb. 3.20: v.l.n.r. Phasendiagramm Al-Si und mögliche Erstarrungsgefüge des Al-Si Eutektikums [114, 142]

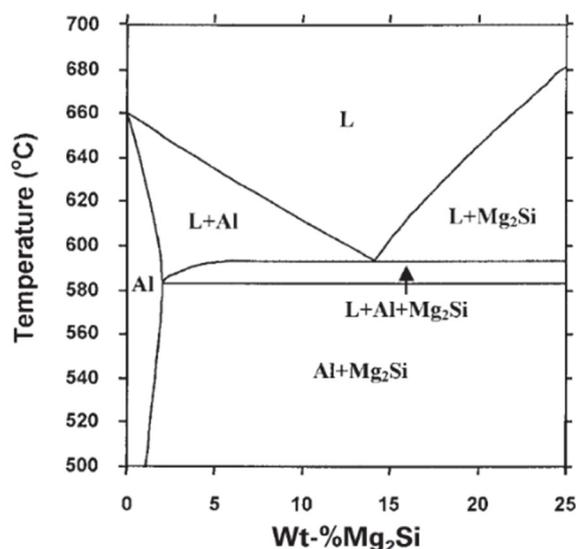
Zu beachten ist, dass sich das Silizium während der Erstarrung etwas ausdehnt und somit dem Volumenschwund des Aluminiums entgegenwirkt. Dadurch kann ein geringerer Porositätsanteil als bei übereutektischen Legierungen festgestellt werden.[15] Die Phasenanteile sind hierbei stark vom Siliziumgehalt abhängig. Um ein unkontrolliertes Wachstum der Mischkristalle zu verhindern, können untereutektische Aluminiumlegierungen durch die Zugabe von Natrium oder Strontium behandelt werden. Dadurch werden zusätzliche Keimstellen für den Mischkristall eingebracht und es entsteht ein feineres Gefüge. [142] Für den klassischen Druckguss sind die untereutektischen Legierungssysteme aufgrund ihrer hervorragenden Gießeigenschaften von wesentlicher Bedeutung.

Das Gefüge von übereutektischen Legierungen ($> 15\% Si$) weist nach der Erstarrung Siliziumkristalle in einer Si-Eutektikum Matrix auf. Die Siliziumkristalle treten hierbei in Form von Platten oder Lamellen auf. Diese Legierungen zeichnen sich, aufgrund der primär ausgeschiedenen Siliziumkristalle, vor allem durch ihre gute Verschleißbeständigkeit aus. Um die mechanischen Eigenschaften anzupassen, kann bei übereutektischen Aluminiumlegierungen mit Phosphor eine Kornfeinung durchgeführt werden. Der wichtigste Vertreter dieser Legierungsgruppe ist die Legierung *AlSi17Cu4Mg* welche für Kurbel- und Pumpengehäuse verwendet wird [3, 15, 142, 143].

3.5.3 Al-Si-Mg Legierungssystem

Eine weitere große Legierungsgruppe ist die Al-Si-Mg Legierung. Speziell das Element Magnesium (in Verbindung mit Silizium) erfüllt in diesen Legierungen die Aufgabe, den Werkstoffen nach einer entsprechenden Wärmebehandlung (WBH) eine höhere Festigkeit zu geben. Im Zuge der WBH bilden sich durch Silizium und Magnesium Mg_2Si Ausscheidungen, die die Festigkeit deutlich beeinflussen. So können auch bei Aluminiumlegierungen Festigkeiten von unlegierten Stahlsorten erreicht werden.

Die maximale Löslichkeit von 1,85% für die Mg_2Si Ausscheidung im $\alpha - MK$ liegt bei einer Temperatur von 585°C. Bei einer langsamen Abkühlung von 585°C auf Raumtemperatur ist eine stetige Verringerung der Mg_2Si Löslichkeit im Aluminium zu beobachten und grobe Mg_2Si -Partikel scheiden sich aus dem $\alpha - MK$ aus.


 Abb. 3.21: Quasibinäres Phasendiagramm von Al-Mg₂Si [71, 84]

Bei rascher Abkühlung bleiben die Mg_2Si -Partikel im α -MK zwangsgelöst. Durch ein anschließendes Warmauslagern bei ca. 170°C scheiden sich die Mg_2Si Ausscheidungen im Mischkristall aus. Durch das Warmauslagern entstehen fein verteilte Mg_2Si -Ausscheidungen die die Festigkeit des Werkstoffes erhöhen.

Tab. 3.9: mech. Kennwerte einer AlSi10Mg (EN AC-43000) Legierung. Vergleich zwischen Gussgefüge und WBH-Gefüge [117]

	Gusszustand	T6-WBH
Zugfestigkeit R_m [MPa]	160-220 (150)	250-320 (220)
Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	80-140 (80)	130-200 (180)
Bruchdehnung A_{50mm} [%]	2-6 (2)	2-5 (1)
Härte HB	50-70 (50)	80-115 (75)

3.5.4 Wärmebehandlung und mechanische Eigenschaften

Aktuell findet hauptsächlich die Aluminiumlegierung AlSi10Mg [24, 26, 27, 40, 86, 87, 96, 101, 118–120] in der additiven Fertigung Verwendung. Zusätzlich finden sich jedoch Berichte über die Verwendung von AlSi12 [72, 92], AlSi5 [166], AlMg1SiCu [97] sowie einer AlMgSc [90, 124] Legierung. Hierbei werden die mechanischen Eigenschaften sowie die Verarbeitbarkeit der Legierungen untersucht. Pulverhersteller für die AlSi10Mg Aluminiumlegierung empfehlen nach dem Bau von Bauteilen aus Aluminium eine Wärmebehandlung bei 300°C für ca. 2h. [47] Ziel ist die Reduzierung und der Abbau der durch den Prozess entstehenden Eigenspannungen.

Das 3-Stoff System Al-Si-Mg bietet weiter noch die Möglichkeit die mechanischen Eigenschaften nach der Verarbeitung im L-PBF Prozess gezielt einzustellen. Hierfür wird die Ausscheidungscharakteristik der Mg_2Si Partikel ausgenutzt. Für Aluminium Knetlegierungen ist die T6 WBH bzw. T5 WBH weit verbreitet. Hierbei werden nach einer speziellen Temperaturführung der Werkstoff und dessen Gefüge so eingestellt, dass höhere Festigkeiten erzielt werden können. [16]

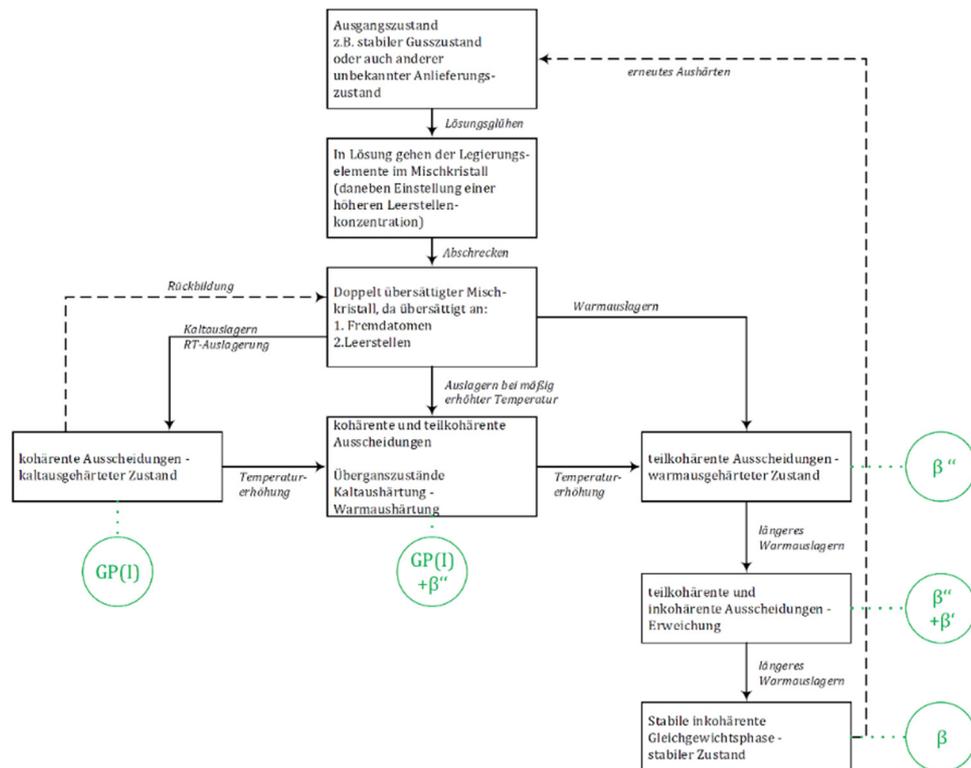


Abb. 3.22: Wärmebehandlung von AlSiMg Legierungen [16]

Die Wärmebehandlung wird speziell bei Aluminiumlegierungen für eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften eingesetzt. Im Allgemeinen werden Knetlegierungen wie 6xxx oder 7xxx Legierungssysteme einer nachfolgenden Wärmebehandlung unterzogen. Ein bekanntes und in der Industrie etabliertes Beispiel ist die Herstellung von Strangpressprofilen bei denen direkt nach der Umformung eine Wärmebehandlung die mechanischen Eigenschaften festlegt. Üblich ist in diesem Zusammenhang eine T6 WBH. Diese beinhaltet ein Lösungsglügen, im MK-Bereich (s. Abb. 3.21) der jeweiligen Legierung, mit nachfolgendem raschem Abschrecken was ein „Einfrieren“ der gelösten Legierungselemente zur Folge hat. Nach dem Lösungsglügen stehen im Wesentlichen zwei Verfahrensrouten zur Auswahl, siehe Abb. 3.22.

3.5.4.1 Kaltauslagerung von AlSiMg Legierungen

Die erste Möglichkeit ist ein Kaltauslagern des lösungsgeglühten Bauteiles bei Raum- bzw. leicht erhöhter Temperatur ($T_{\max} = 70-100^{\circ}\text{C}$). Es folgt eine charakteristische Ausscheidungs-Bildungssequenz. Zu Beginn bilden sich in einer Al Matrix eingebettete Si- und Mg-Cluster. Die Mg-Cluster lösen sich im weiteren Verlauf zugunsten der Si-Cluster auf. Es entstehen mit Mg Atomen angereicherte Si/Mg Co-Cluster. Guinier-Preston (GP) Zonen bilden die letzte Sequenz in der Ausscheidungsreihenfolge. Diese GP Zonen bestehen aus kohärenten Mg und Si Clustern die in weiterer Folge auch maßgeblich die erzielbare Härtesteigerung beeinflussen.



Auf der Grundlage dieses Mechanismus kann bei andauernder Kaltauslagerung (1-3 Tage) eine deutliche Härtesteigerung (Abb. 3.23) beobachtet werden. [55, 78]

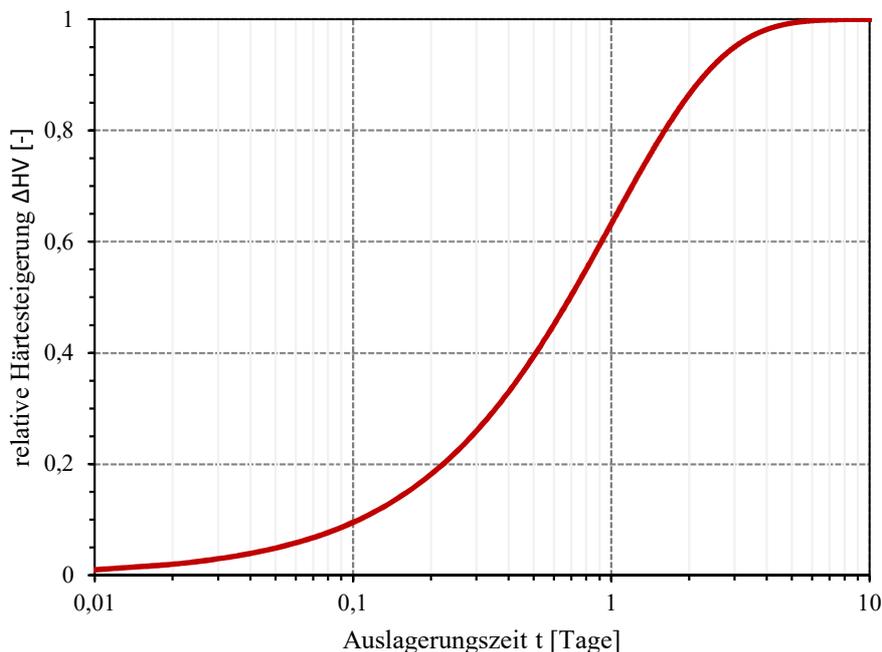


Abb. 3.23: Relative Härtesteigerung durch Kaltauslagerung bei AlSiMg-Legierungen

Durch eine Kaltauslagerung können jedoch im Vergleich zu einer Warmauslagerung nur geringe Härtesteigerungen erzielt werden. Generell verwendet man für AlSiMg Systeme die Warmauslagerung für die Justierung der mechanischen Eigenschaften.

3.5.4.2 Warmauslagerung von AlSiMg Legierungen

Im Gegensatz zur Kaltauslagerung muss bei einer Warmauslagerung eine definierte Temperatur für eine bestimmte Zeit gehalten werden, damit sich die härtesteigernden Ausscheidungen bilden können. Hierfür gibt es in der Literatur einige Werte für die WBH von AlSiMg Legierungssystemen. Auffällig ist, dass die WBH Routen vorwiegend für Knetlegierungen beschrieben werden. Das kommerziell erhältliche Al-Pulver für die additive Fertigung basiert jedoch auf der Gusslegierung EN AC-43000 bzw. AlSi10Mg. Demnach muss in Bezug auf die additive Fertigung das WBH-Verhalten von Gusslegierungen untersucht werden. Als Grundlage für die Untersuchung von additiv verarbeiteten AlSi10Mg können jedoch die Ergebnisse aus der Literatur ([62, 63, 137–141, 145, 147, 151, 167]) herangezogen werden. Diese befassen sich mit der Ausscheidungskinetik von gängigen Aluminium Knetlegierungen.



Bei einer Warmauslagerung von AlSiMg Legierungen ist die Bildung von teilkohärenten Mg_2Si Nadeln, auch als GP(II) oder β'' bezeichnet, maßgeblich für die erzielbare Härte verantwortlich.[55, 62, 63, 145, 147, 151] Zusätzlich wirkt sich eine ausgedehnte Lagerdauer zwischen Lösungsglügen und Auslagerung negativ auf die erzielbare Härtesteigerung aus. Grund hierfür ist der kurz nach dem Abschrecken eintretende Kaltauslagerungseffekt. Dieser bildet, wie in Kapitel 3.5.4.1 beschrieben, GP(I) Zonen welche die Bildung von β'' Phasen hemmen und somit die erzielbare Härte reduzieren. Um diesen Effekt zu vermeiden wird von Ostermann [55] ein sog. Stabilisierungsglügen vorgeschlagen. Dieses Stabilisierungsglügen unterbindet den Kaltauslagerungseffekt und wirkt sich somit positiv auf eine nachfolgende Warmauslagerung aus.

Um eine maximale Härtesteigerung zu erzielen, müssen Temperatur und Haltedauer während der WBH aufeinander abgestimmt werden. Wird der Werkstoff jedoch bewusst länger einer WBH unterzogen erreicht man den Bereich der Überalterung (z.B. T7-WBH). Im überalterten Bereich nimmt die Härte wieder ab. Die zuvor gebildeten nadelförmigen β'' Ausscheidungen wandeln sich zuerst in teilkohärente Stäbchen (β') und bei weiter andauernder WBH in die inkohärente plattenförmige Gleichgewichtsausscheidung β um. In diesem Stadium ist wieder ein Härte minimum zu finden.

3.5.4.3 Grundlagen der Ausscheidungshärtung

Für die mathematische Beschreibung der Ausscheidungssequenz und auch der Ausscheidungskinetik kann in der Literatur der empirische Ansatz nach Avrami (JMAK - Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorow [6, 107]) gefunden werden. Dieser basiert auf einer Exponentialfunktion und wird nach Gl. 3.26 beschrieben.

$$f(t) = 1 - e^{-r \cdot t^k} \quad \text{Gl. 3.26}$$

Hierbei steht $f(t)$ für den Anteil an bereits erzeugten Partikeln, t für die Haltedauer auf einem Temperaturniveau, k für den Avramiexponenten und r für eine konstante Reaktionsrate. Die Reaktionsrate bzw. Evolutionsrate kann weiter mit einem Arrhenius-Ansatz (Gl. 3.27) beschrieben werden.

$$r = r_0 \cdot e^{-\frac{Q_a}{R \cdot T}} \quad \text{Gl. 3.27}$$

Auf dieser mathematischen Grundlage können für verschiedenste Vorgänge wie (Re-) Kristallisation und Wachstum realitätsnahe Vorhersagen getroffen werden. Für die Ausscheidungskinetik können weiter die bekannten isothermen Zeit-Temperatur-Ausscheidungsdiagramme (Abb. 3.24) erstellt werden.

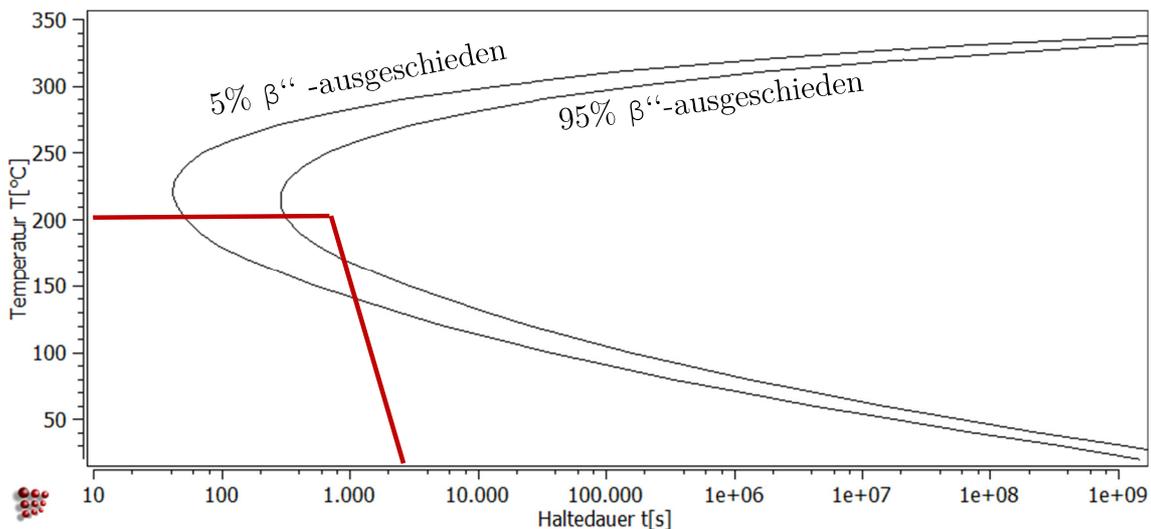


Abb. 3.24: Exemplarisches ZTA für β'' einer AlSiMg Legierung (berechnet mit MATCALC)[114]

Ein wichtiger Parameter für die Beschreibung von temperaturabhängigen Vorgängen ist die jeweilige Aktivierungsenergie Q_a . Die Aktivierungsenergie spiegelt die für die Reaktion (oder Ausscheidung) notwendige Energie wieder. Die Bestimmung der Aktivierungsenergie wird in der Praxis mittels Differenzial-Thermo-Analyse (DTA), oder auch Differential-Scanning-Calometry (DSC) genannt, durchgeführt. Hierbei wird der Wärmestrom während des Aufheizens, oder Abkühlens, einer Probe mit einer Referenzprobe verglichen und aufgezeichnet. Am dadurch entstehenden Diagramm (Abb. 3.25) können dann weiter exotherme und endotherme Reaktionen wie das Entstehen oder Auflösen von Ausscheidungen dargestellt werden.

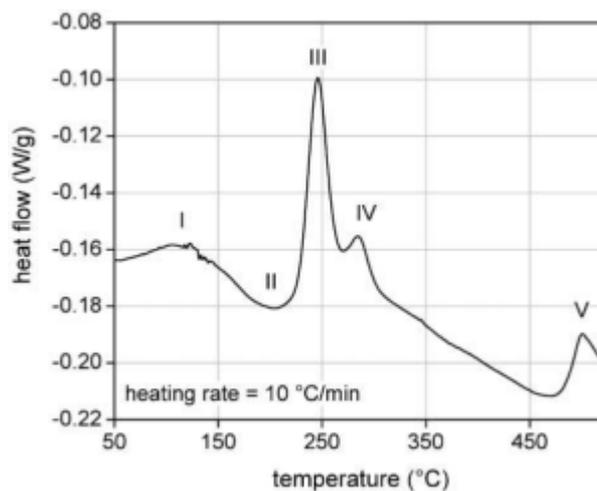


Abb. 3.25: DSC Kurve der Aluminiumlegierung AA6110 [80]

Werden diese Aufheiz- oder Kühlkurven bei unterschiedlichen Heiz- oder Kühlraten durchgeführt, verschieben sich die jeweiligen Ausscheidungspeaks und geben so Aufschluss über die Aktivierungsenergie der jeweiligen Ausscheidung.

3.5.5 Mikrostruktur nach der additiven Verarbeitung

Aluminium und Aluminiumlegierungen bieten aufgrund ihrer guten Eigenschaften viele Möglichkeiten, konstruktive Probleme zu lösen. Aus dem Schiffs- und Automobilbau ist diese Werkstoffgruppe nicht mehr wegzudenken. Durch neue Technologien, wie die generative Fertigung (L-PBF), werden neue konstruktive und optimierte Lösungen für die verschiedensten Anwendungsgebiete herstellbar. Zu berücksichtigen ist, dass wie bei jeder anderen Fertigungstechnologie unterschiedliche Fertigungsrestriktionen vorhanden sind und eingehalten werden müssen.

Damit Aluminiumlegierungen mit dem L-PBF-Prozess verarbeitet werden können, muss jedoch eine grundlegende Untersuchung hinsichtlich Mikrogefüge durchgeführt werden. Das Gefüge von Gusslegierungen wird im Wesentlichen durch die Erstarrungsbedingungen wie Kühlrate und Temperaturgradient bestimmt. So können mit unterschiedlichen Gießverfahren unterschiedliche Gefüge hergestellt werden. Ein weiteres Maß zur Vorhersage des Gefüges ist die Unterkühlung. Sie ist die Triebkraft für die Keimbildung und steuert direkt das entstehende Gefüge. Je stärker die Unterkühlung ausgeprägt ist, desto feiner wird das Gefüge. In der Vergangenheit wurden einige Untersuchungen bezüglich „Rapid-Solidification (RS)“ durchgeführt um das entstehende Mikrogefüge zu charakterisieren [57, 70, 144]. Ergebnis dieser Untersuchung war, dass mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit das Gefüge feiner wird (Abb. 3.26). Bei Aluminiumlegierungen bedeutet dies, dass statt einem dendritischen Wachstum ein zellulär-dendritisches Wachstum (Abb. 3.27) forciert wird.

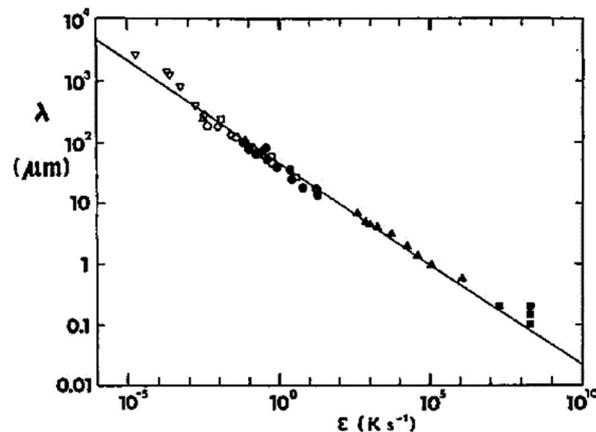


Abb. 3.26: Veränderung der Zellgröße bei sehr rascher Erstarrung [69]

Beim L-PBF-Prozess werden aufgrund des Volumenverhältnisses zwischen Schmelze und Festkörper sehr hohe Abkühlraten von bis zu $10^7 \frac{K}{s}$ erreicht. Dadurch kann eine sehr feine Mikrostruktur prognostiziert werden (Zellgröße $\sim 0,5 \mu m$). Ein Kennwert zur Beurteilung der Feinheit von Aluminiumlegierungen ist der Dendritenarmabstand (DAS). Dieser kann empirisch über die lokale Erstarrungszeit $t_f \left[\frac{K}{s} \right]$ und einen werkstoffabhängigen Parameter $y \left[\frac{\mu m}{\sqrt[3]{s}} \right]$ nach Gl. 3.28 berechnet werden [14].

$$\lambda_z = y * \sqrt[3]{t_f} \quad \text{Gl. 3.28}$$

Die lokale Erstarrungszeit t_f wird mittels Gl. 3.29 für die jeweilige Aluminiumlegierung ermittelt.

$$\dot{T} = \frac{T_{S-L}}{t_f} \quad \text{Gl. 3.29}$$

Die erforderlichen Kennwerte für die Berechnung der lokalen Erstarrungszeit sind in Tab. 3.10 für unterschiedliche Aluminiumlegierungen dargestellt.

Tab. 3.10: Werkstoffparameter für die Bestimmung der lokalen Erstarrungszeit von Aluminiumlegierungen [14]

Legierung	$\gamma \left[\frac{\mu\text{m}}{\sqrt[3]{s}} \right]$	Erstarrungsintervall
		$T_{S-L} [K]$
AlMg3	11,1	50
AlMg5	10,5	80
AlSi5Mg	11,5	70
AlSi7Mg	11,0	55
AlSi10Mg	10,4	45
AlCu4Ti	12,4	90
Al99,8	20,4	
Al99,5	18,5	

Nach Gl. 3.28 und Gl. 3.29 kann für die Legierung *AlSi10Mg* unter L-PBF-typischen Abkühlbedingungen bei einmaligem Aufschmelzen eine Zellgröße von **0,468 μm** berechnet werden. Die Untersuchungen von Thijs et al. [96] und Lam [101] bestätigen dieses Ergebnis. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird bei einer, an den L-PBF-Prozess anschließenden Analyse des Mikrogefüges von *AlSi10Mg* ein zellulär-dendritisches Gefüge mit einer Zellgröße von **0,2 μm** im Schmelzbadmittelpunkt bis **0,7 μm** in der Wärmeeinflusszone (WEZ) gefunden (Abb. 3.27). Weiters wird im Zuge der Untersuchungen von Froes et al. [57] festgestellt, dass die maximale Löslichkeit von einigen Elementen im festen Aluminium bei sehr rascher Erstarrung stark erhöht ist. Mangan kann z.B. in Aluminium bei rascher Abkühlung bis ca. **10%** gelöst werden, wohingegen der maximale Mangangehalt bei einer Gleichgewichtserstarrung bei **0,9%** liegt. In der Literatur ([84]) findet man speziell für die Ausscheidungscharakteristik von *Mg₂Si* quasibinäre Zustandsdiagramme (Abb. 3.21). Dieses Zustandsdiagramm zeigt für die Ausscheidungen eine maximale Löslichkeit von **1,91%** bei 583,5°C. Wie bereits beschrieben führt das Vorhandensein von *Mg₂Si* Ausscheidungen zu einer Steigerung der

Festigkeit des Werkstoffes. Bei sehr rascher Erstarrung (L-PBF) treten die Mg_2Si Ausscheidungen noch nicht als Partikel in Erscheinung. Magnesium liegt nach einer raschen Erstarrung zwangsgelöst im zellulär-dendritischen Gefüge vor und wird erst durch eine nachfolgende Wärmebehandlung ausgeschieden. Je nach Wärmebehandlungen können so unterschiedliche Festigkeiten, Bruchdehnungen und Gefüge eingestellt werden. Gängig sind für 6000er Aluminium-Knetlegierungen die T5 und T6 Wärmebehandlungen.

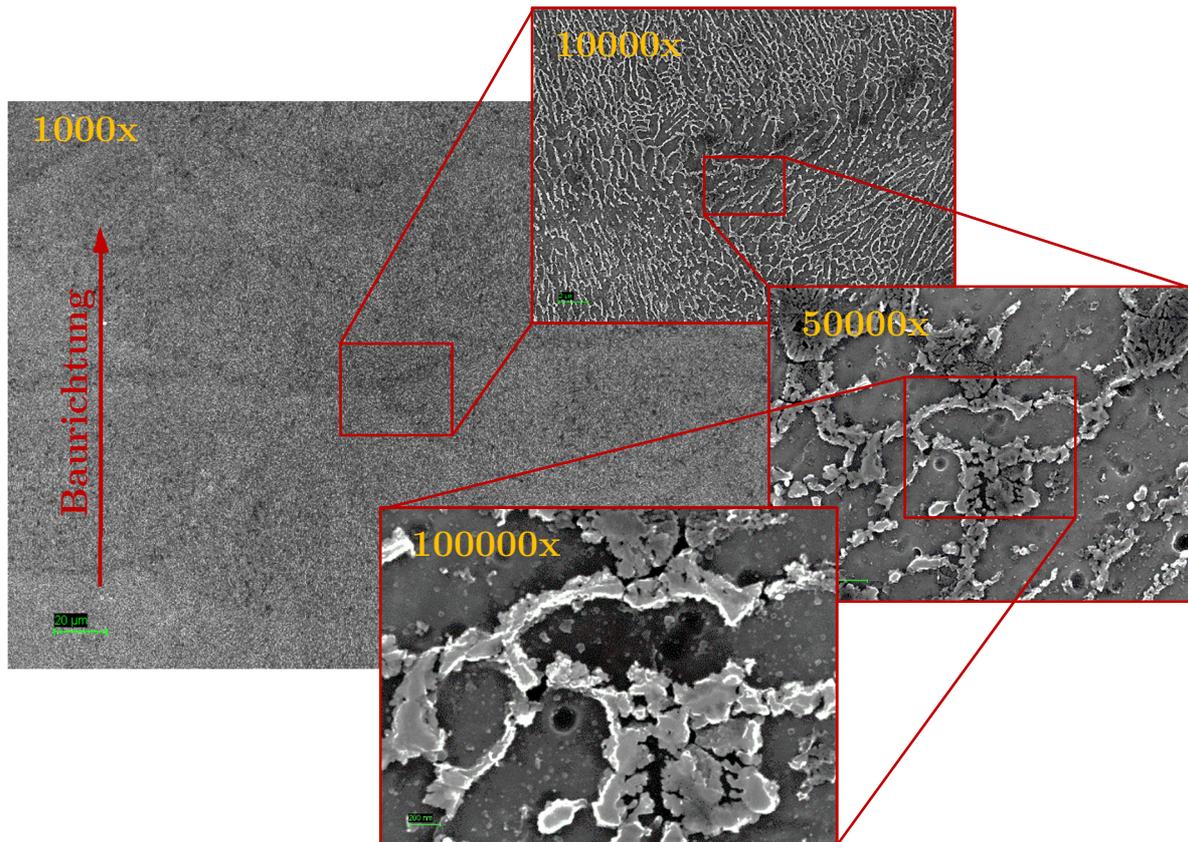


Abb. 3.27: Mikrostruktur eines L-PBF-gefertigten AlSi10Mg Bauteils – ohne WBH

Hierbei steht T5 für ein warmes Auslagern der Legierung bei Temperaturen von 170-200°C und einer Auslagerdauer zwischen 4-16h. Die T6 Wärmebehandlung inkludiert vor dem Auslagern ein Lösungsglühen. In der Regel wird ein Lösungsglühen immer im Einphasengebiet durchgeführt, damit sich alle Legierungselemente im Mischkristall lösen. Durch eine nachfolgende rasche Abkühlung des Bauteils werden so fein verteilte Ausscheidungen, der bei niedrigeren Temperaturen zwangsgelösten Elemente gebildet. Das nachfolgende warme Auslagern stabilisiert diesen Zustand der weiter zu einer Erhöhung der Festigkeit führt.

3.6 Anwendungsgebiete für zelluläre Strukturen

Alle Optimierungsmethoden haben eines gemeinsam – sie erzeugen sehr oft Geometrien die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren nur sehr schwer oder überhaupt nicht herstellbar sind. Die aus der Topologie- oder Topographieoptimierung generierten Geometrien und Formen können jedoch problemlos mittels additiver Fertigung hergestellt werden. Strukturierte Materialien, seien es Oberflächen oder Volumenstrukturen, bieten neue Möglichkeiten, physikalische, in der Natur vorkommende und durch die Evolution optimierte Mechanismen für die Erfüllung technischer Funktionen oder Anforderungen zu nutzen. Die Strukturierung kann auf mikroskopischer aber auch auf makroskopischer Ebene festgelegt werden. Die mikroskopische Strukturierung hat in der Regel das Ziel der Bauteiloberfläche haptische oder optische Funktionen zuzuweisen. So kann z.B. der Lotus Effekt (Abperleffekt/Selbstreinigung) oder die Funktion der strukturierten Haifischhaut (geringer Widerstand beim Schwimmen im Wasser) nachempfunden werden. Bei der makroskopischen Strukturierung wird ein großer Wert auf einen hierarchischen Aufbau gelegt. So können enorme Belastungen bei einer gleichzeitigen deutlichen Reduktion des Gewichtes abgefangen werden.

Je nach geometrischer Anordnung der einzelnen Streben in regulären Gitterstrukturen können klassische Fachwerke aber auch Strukturen mit speziellen mechanischen Verhalten erzeugt werden. Konventionelle Bauteile erzeugen bei einer einseitigen Kompression eine Expansion in die Querrichtung. Das Verhältnis zwischen der Längenänderung und der Breitenänderung wird mechanisch durch eine positive Poisson-Zahl (Querkontraktionszahl) ausgedrückt.

Eine weitere Möglichkeit Gitter regelmäßig anzuordnen sind auxethische Strukturen. Neben einer negativen Poisson-Zahl besitzen auxethische Strukturen einzigartige mechanische Eigenschaften. Im Gegensatz zu herkömmlichen soliden Werkstoffen (z.B. bei einer Zugprobe) erzeugt eine uniaxiale Druckbelastung oder eine uniaxiale Zugbelastung bei auxethischen Strukturen eine allseitige Kompression oder Expansion. Derartige Strukturen können durch eine bikonkave Anordnung der Seitenstreben von Gitterstrukturen hergestellt werden (Abb. 3.28). Ein exemplarisches Anwendungsgebiet für auxethische Strukturen sind persönliche Sicherheitseinrichtungen.

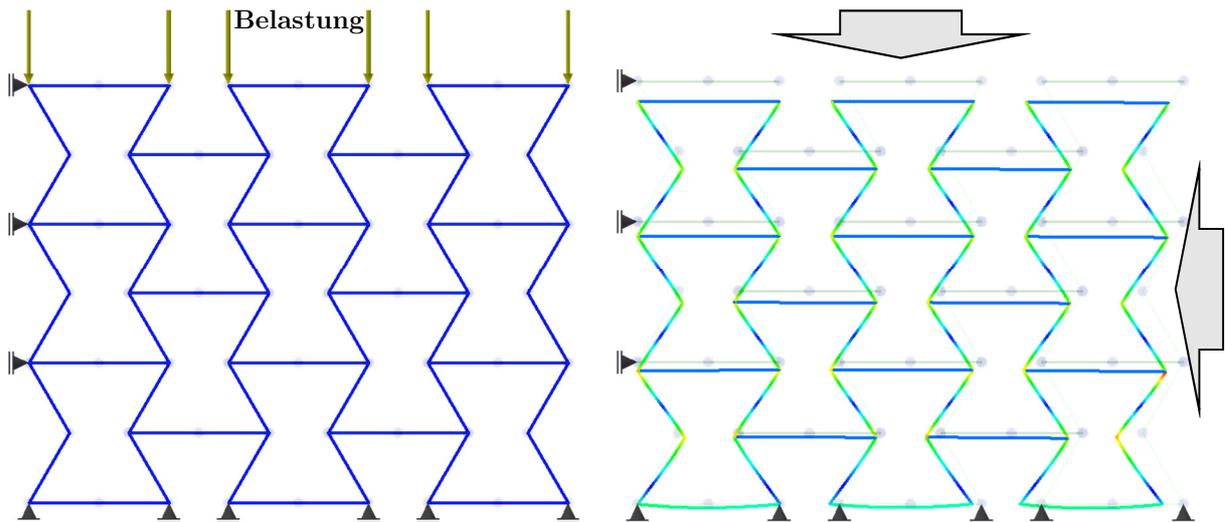


Abb. 3.28: Auxethisches Verhalten einer Fachwerkstruktur bei uniaxialer Belastung.
(Rahmenanalyse durchgeführt mit Autodesk Nastran In-CAD)

Diese Strukturen können, bei einer gezielten Implementierung, eine Selbststärkung des Bauteils erzeugen. D.h. bei einem massiven lokalen Aufprall eines Fremdkörpers auf diese Struktur, führt das mechanische Verhalten zur Stärkung der Deformationszone, da das umliegende Material zum Aufprallort „hinfließt“. Zwei weitere konkrete Anwendungsgebiete für Gitterstrukturen sind hybride Verbindungen (Kapitel 3.6.1) zwischen artfremden Werkstoffen und eine optimierte Kühlung für Werkzeugeinsätze (Kapitel 3.6.2, 3.6.3 und 3.6.4).

3.6.1 Anwendung für hybride Metall/Polymer Verbindungen

Die Schnittstelle zwischen Kunststoff und Stahl ist heutzutage vielerorts zu finden und stellt den Konstrukteur oft vor eine Herausforderung. Bei konventionellen Entwicklungen wird eine derartige Multimaterialverbindung häufig durch Kleben realisiert. Ein gewichtiger Nachteil ist die sehr geringe thermische Stabilität einer Klebeverbindung. So kommt es bei erhöhten Betriebs- und Einsatztemperaturen oft zu einem vorzeitigen Versagen dieser Verbindung. Interessant ist eine derartige Verbindung unter anderem für die Automobilindustrie sowie für hochfeste Leichtbauverbindungen in der Luft- und Raumfahrt.

Grujicic et al [104] untersucht die Festigkeit einer formschlüssigen Metall-Polymer Hybridverbindung hergestellt über Spritzguss. Grundsätzlich ähnelt die Form der Verbindung hierbei einer herkömmlichen Clinch-Verbindung. Jedoch kommt ein formgebender Clinchvorgang zum Einsatz. Die metallische Verbindungshälfte wird

konventionell und die Polymerhälfte über einen nachgeschalteten Spritzgussprozess hergestellt. Es werden maximale Auszugskräfte einer Punktverbindung von ca. 9N auf Schub und 8N auf Zug erreicht.

Ebenfalls über mechanisches Clinchen untersucht Lambiase [52–54] die Multimaterialverbindung zwischen einem thermoplastischen Polymer und einer 6082 Aluminiumlegierung. Im Unterschied zu Grujicic werden in diesem Fall der Kunststoff und das Aluminiumblech gemeinsam konventionell verbunden. Untersucht werden kunststoffseitig Verbindungen aus Al + (PS / PMMA / PC). Hierbei werden bei der Kombination Al/PMMA die höchsten Abziehkräfte von 1,5-2kN erreicht. Eine etwas geringere Abziehfestigkeit von 1,4-1,7kN wird bei der Kombination Al/PC erreicht. Diese Verbindung besitzt jedoch eine wesentlich höhere Dehnreserve (2,5-4mm) als die untersuchte Al/PMMA Verbindung (0,4-1,1mm). Die schlechteste Kombination ist eine Al/PS Hybridverbindung. Diese besitzt eine sehr geringe Abziehfestigkeit (0,4kN) und eine sehr geringe Dehnreserve (0,25mm).

Kah et al [122] und Amancio-Filho et al [148] zeigen eine generelle Übersicht von möglichen Verbindungstechniken für die Herstellung eines Metall/Polymer Hybridverbundes. Die Verbindungstypen werden hierbei in adhäsive, mechanische und energetische Verbindungen unterteilt. Im Speziellen werden hier das Ultraschallschweißen, das Laserschweißen sowie das Reib-Punkt-Schweißen behandelt. Am häufigsten sind Hybridverbindungen, hergestellt mittels Laserschweißen, in der Literatur zu finden. So beschreiben Bergmann et al [85], Fortunato et al [2], Schrickler et al [91], Rodriguez-Vidal et al [42] und Rösner et al [5] die Potentiale und erzielbare Festigkeiten sowie die Herstellung einer lasergeschweißten Polymer/Metall Hybridverbindung.

Liu et al [56] beschreibt die Herstellung einer Hybridverbindung mittels Reibschweißen. Die betrachtete Verbindung besteht aus AA6061 und MC Nylon-6. Ergebnisse sind die erzielbaren Scherfestigkeiten sowie Prozessbedingung für die erfolgreiche Herstellung der Hybridverbindung.

Eine weitere bekannte Möglichkeit Kunststoff und Metallische Werkstoffe zu verbinden ist eine Quetschverbindung wie sie von Abibe et al [7] beschrieben wird. Hierbei ragt ein Metallstift durch das Polymer-Bauteil. Dieser Metallstift wird anschließend via Presse umgeformt, sodass eine nicht lösbare formschlüssige Verbindung entsteht.

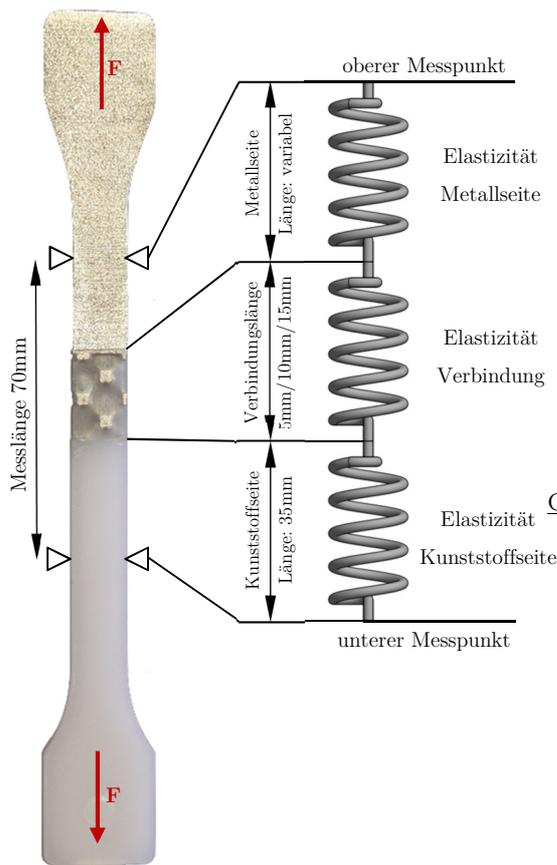
Im Zuge dieser Überlegungen werden die Möglichkeiten und Potentiale der additiven Fertigung für die Herstellung einer Multimaterial-Hybridverbindung untersucht. Ergebnis ist eine werkstoffunabhängige additiv hergestellte und patentierte Formschlussverbindung, welche nicht nur Kunststoffe und Metalle verbindet, sondern auch um Metalle mit deutlich unterschiedlichen Schmelzpunkten (und auch nicht miteinander verschweißbare) zu verbinden. Die Qualität der Verbindung wird über einen standardisierten Zugversuch mittels Zwick Z250 untersucht. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Steifigkeit und die Tragfähigkeit (Festigkeit) der Hybridverbindung gelegt.

3.6.1.1 Bestimmung der Tragfähigkeit (Festigkeit)

Für die Tragfähigkeit wird aus den durch den Zugversuch bestimmten Kraft/Weg Kurven ein σ/ϵ Diagramm berechnet. Die maximale Tragfähigkeit wird daraus über den maximalen Anstieg der Spannung (entspricht der Zugfestigkeit R_m) definiert. Abschließend werden alle Verbindungstypen mit einer Referenzprobe (reine Kunststoffprobe) verglichen und evaluiert.

3.6.1.2 Bestimmung der Verbindungssteifigkeit

Die Steifigkeit der Verbindungszone wird aus der im Zugversuch bestimmten Elastizität der Zugprobe und den Elastizitäten der Metall- bzw. Polymerkomponente berechnet. Hierbei wird das betrachtete System in ein elastisches serielles Federsystem umgewandelt. Im Anschluss werden die Federkonstanten der Zugprobe sowie der Metall- und Polymerkomponente bestimmt. Die Federkonstante der Verbindungszone wird über die Reihenschaltung des Federsystems bestimmt woraus sich schlussendlich die Elastizität der Verbindungszone ableiten lässt. Die so berechneten Elastizitätswerte entsprechen schlussendlich der Steifigkeit der hybriden Verbindung abzüglich der Metall- und Kunststoffbeiträge von den gemessenen Gesamtverschiebungen und -dehnungen.



Bestimmung der Federkonstanten für St & KS:

$$\zeta_{St} = \frac{E_{St}A}{l_{St}} \left[\frac{N}{mm} \right]; \quad \zeta_{KS} = \frac{E_{KS}A}{l_{KS}} \left[\frac{N}{mm} \right]$$

Bestimmung der Federkonstante für die Verbindung:

$$\zeta_{Verb.} = \frac{\zeta_{ges} \zeta_{St} \zeta_{KS}}{\zeta_{St} \zeta_{KS} - \zeta_{ges} \zeta_{KS} - \zeta_{ges} \zeta_{St}} \left[\frac{N}{mm} \right]$$

Berechnung der Elastizität der Verbindungszone:

$$E_{Verb.} = \frac{\zeta_{Verb.} l_{Verb.}}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Belastung:

$$A = 10mm * 4mm = 40mm^2$$

Gesamtelastizität der Zugprobe zwischen den Messpunkten:

$\zeta_{ges} \rightarrow$ Bestimmt aus der gemessenen Elastizität

Ausgangslängen für die Metall- und Kunststoffseite:

$$l_{St} \rightarrow 30mm/25mm/20mm$$

$$l_{KS} = 35mm \rightarrow \text{konstant}$$

$$l_{Verb.} = 5mm/10mm/15mm$$

Werkstoffkennwerte:

$$E_{St} = 175GPa; \quad E_{KS} = 1,7GPa$$

$$R_{p0,2}^{St} = 1GPa; \quad R_{p0,2}^{KS} = 18MPa$$

Abb. 3.29: Bestimmung der Verbindungssteifigkeit

3.6.2 Additive Fertigung im Werkzeugbau - Kühlung I

Der Werkzeugbau stellt heute den größten Anwendungsbereich der additiven Fertigung dar. Mit dieser Fertigungstechnologie können optimierte, von der Natur inspirierte Kühlstrukturen in Formeinsätze kostengünstig integriert werden.

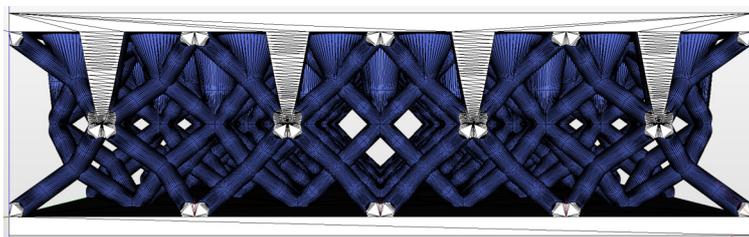


Abb. 3.30 Beispiel einer möglichen zellulären Kühlgeometrie

Unter diesem Gesichtspunkt wird die Verwendung von regulären Gitterstrukturen für die Anwendung als tragende und zugleich kühlungssteigernde Formeinsatzelemente vorgestellt. Die Basis ist eine analytische Abschätzung der Wirksamkeit möglicher feiner oder zellulärer Strukturen. Zu diesem Zweck wird das Verhältnis zwischen dem spezifischen Wärmestrom \dot{q}_{l_s} in die Struktur (Nadel) mit dem spezifischen Wärmestrom

über die glatte Formwand \dot{q}_{ks} bestimmt. Die Normierung der Wärmeströme erfolgt über einen einheitenlosen Flächenteiler φ . Über den Quotienten κ wird schlussendlich die Wirksamkeit der Struktur hinsichtlich direkten Wärmetransport ausgedrückt.

Wirksamkeit der Nadelkühlung zur ebenen Wandkühlung:

$$\kappa = \frac{\dot{q}_{ls}}{\dot{q}_{ks}} = \frac{\lambda * \varphi}{\alpha * (1 - \varphi) * x} \quad \text{Gl. 3.30}$$

3.6.2.1 Analytische Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α

Gitterstrukturen lassen sich auch als regelmäßig angeordnete Rohrbündel darstellen. Daher kann man den Formalismus für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für quer angeströmte Rohrbündel [64–67] auf diese Gitterstrukturen umlegen und anwenden.

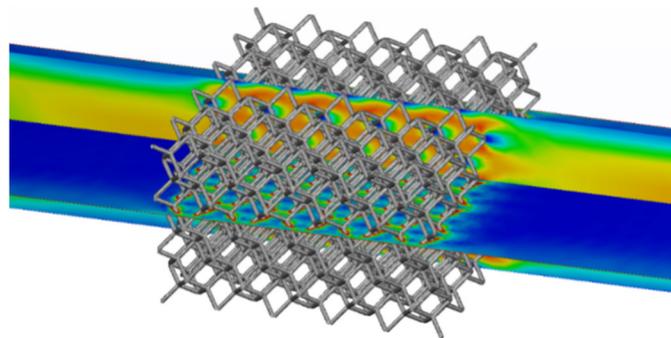


Abb. 3.31: Simulation der Strömung durch Gitterstrukturen. Dargestellt ist auf der horizontalen Ebene die Verwirbelung des Fluids und auf der vertikalen Ebene die Fluidgeschwindigkeit.

Unterschieden wird jedoch zwischen einer versetzten und fluchtenden Anordnung der Ausprägungen. Für regelmäßig angeordnete (fluchtende) Gitterstrukturen sind die notwendigen Parameter für unterschiedliche Strömungsbereiche in Tab. 3.11 angegeben.

Tab. 3.11: Tabellenwerte für m und c für eine fluchtende Anordnung [73]

Nr.	Reynolds Zahl Re	m	c
1	$200 \leq Re \leq 10^3$	0,5	0,52
2	$10^3 \leq Re \leq 2 * 10^5$	0,63	0,27
3	$Re \geq 2 * 10^5$	0,84	0,02

Neben der Anordnung wird auch die Anzahl der seriellen Strebenreihen mittels Reihenfaktor (Tab. 3.12) berücksichtigt. Für die Anwendung als Kühlung eines Formeinsatzes kann eine Anzahl von Gitterelementen >10Stk. in Serie (X-Y Ebene) angenommen werden.

Tab. 3.12: Tabellenwerte für den Reihenfaktor abhängig von der Reihenanzahl [73]

Nr.	Strömungsbereich	Reihenanzahl	Reihenfaktor F
1	$10^2 < Re < 10^3$	1-5	0,90
2		10	1,00
3	$Re > 10^3$	1	0,60
4		3-5	0,85
5		>10	1,00

Für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten kann mit diesen Tabellenwerten die Nusselt-Zahl Nu bestimmt werden.

$$Nu_m = c * Re^m * Pr^{0,3} * \left(\frac{Pr_F}{Pr_W}\right)^P * F \quad \text{Gl. 3.31}$$

mit dem Gültigkeitsbereich:

$$\begin{aligned} 30 &\leq Re \leq 1,2 * 10^6 \\ 0,71 &\leq Pr \leq \infty \end{aligned}$$

Abschließend kann über den Zusammenhang nach Gl. 3.32 der mittlere Wärmeübergang bestimmt werden. Der Längenwert L stellt hierbei eine für die Strömung charakteristische Länge dar, was im vorliegenden Fall einer Strebenbündelqueranströmung dem Außendurchmesser der Einzelstrebe entspricht.

$$\alpha_m = \frac{\lambda}{L} Nu(Pr, Re) \quad \text{Gl. 3.32}$$

Für die Anwendung von Gitterstrukturen für die Kühlung von Werkzeugen werden abschließend für unterschiedliche Gittergrößen die mittleren Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt.

Tab. 3.13: Wärmeleitfähigkeit für Gitter mit 30% rel. Dichte

Nr.	Gitter	Reihen- anzahl [Stk.]	Streben- durchmesser d[mm]	Streben- länge l[mm]	Geschw. v_1 [m/s]	Nu [-]	α_m [W/m ² K]	η_R [%]	κ [%]
1	30p16 ³	10	3,08	6.928	10 ⁻³	1174	1,0*10 ⁵	19	15,5
2	30p8 ³	10	1,540	3,464	10 ⁻³	830	1,4*10 ⁵	23	14,7
8	30p4 ³	10	0,770	1,732	10 ⁻³	587	2,0*10 ⁵	27	15,5

Neben der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für die Kühlwirkung der Gitterstrukturen ist auch die mechanische Belastung bei Formeinsätzen für den Druckguss ein maßgeblicher Faktor. Beim Aluminium Druckguss (HPDC) werden z.B. maximale Drücke von 200MPa und Formfüllgeschwindigkeiten von bis zu 12m/s erreicht [142]. Demnach muss auch eine Optimierung der Lastpfade im Sinne einer Formoptimierung durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit die optimale Geometrie für Kühlkörper zu generieren ist über die Verwendung des Topologieoptimierungsalgorithmus mit der Änderung, dass nicht die Steifigkeits-/Nachgiebigkeitsmatrix optimiert wird, sondern die Leitfähigkeitsmatrix.

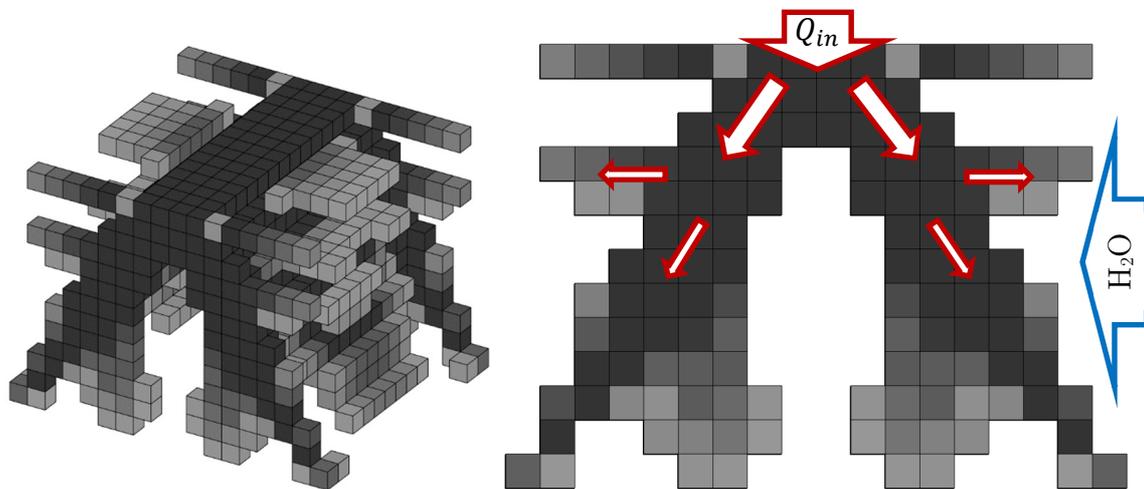


Abb. 3.32: Ergebnis einer Optimierung hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit mittels Top3D [88]

Dadurch können ebenfalls effiziente Strukturen für die Wärmeabfuhr entwickelt werden. Ergebnis dieser angepassten Optimierung ist eine, analog zur klassischen Topologieoptimierung gestalteten, wurzelähnlichen Struktur mit dem Fokus auf maximalen Wärmetransport. Kennzeichnend ist eine kontinuierliche Abnahme des leitfähigen Querschnitts mit fortschreitenden Wärmeleitungspfad. Demnach nimmt die

Wirksamkeit mit zunehmender Länge ab. Ausgehend von diesen Basisüberlegungen kann ein Potential für die Anwendung von regulären Gitterstrukturen für die Anwendung als Kühl- und Stützelemente in Werkzeugeinsätzen prognostiziert werden.

3.6.2.2 Ergebnis der Wärmeübergangszahlbestimmung

Eine fluchtende Anordnung von Streben ergab für die analytisch bestimmte Wärmeübergangszahl, für die in Abb. 3.33 dargestellte Strebengeometrie, von $10^5 \text{W/m}^2\text{K}$. Zusätzlich ist die maximale Eindringtiefe von ca. 40% der Strebenlänge limitierend.

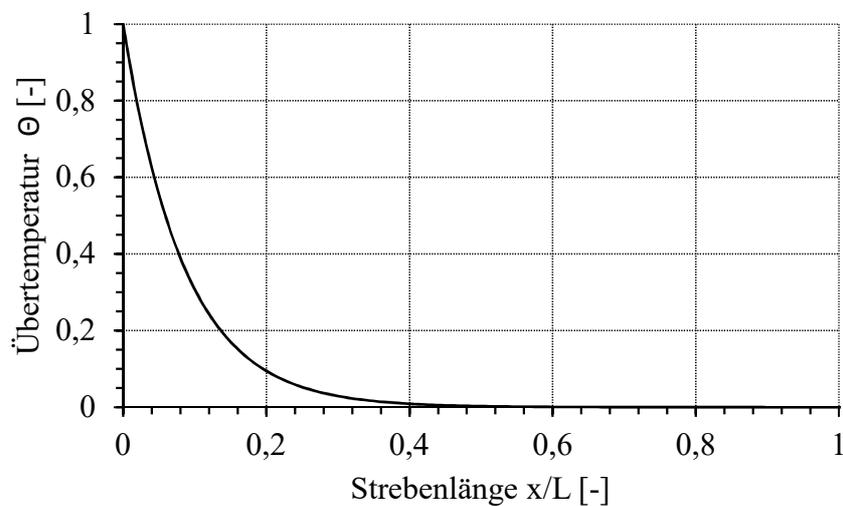


Abb. 3.33: Temperaturüberhöhung einer Kühlnadel im Reihenverbund (>10 Streben) mit einem Durchmesser von 3,08mm, einer Strebenlänge von 8mm und einer Kühlwassergeschwindigkeit im Einlass von 1cm/s

Die Eindringtiefe kann einerseits über eine geringere Fließgeschwindigkeit des Kühlmittels oder über eine konische Strebenform (breit am Fuß und schmal auf der kühleren Seite) erreicht werden. Jede Kühlrippe oder -nadel wird über einen spezifischen Parameter ml charakterisiert.

$$ml = \sqrt{\frac{\alpha * U_{KR}}{\lambda * A_{KR}}} * L_{KR} \quad \text{Gl. 3.33}$$

Dieser wird über den Wärmeübergang α , die Wärmeleitfähigkeit λ und den Geometrieparametern U_{KR} , A_{KR} und L_{KR} der Kühlrippe nach Gl. 3.33 bestimmt. Der optimale Bereich für Kühlrippen jeglicher Form liegt bei einem ml -Wert (Wirkungsgrad, siehe

Abb. 3.34) zwischen $0,7 < ml < 2$. [73] Bei einem ml -Wert von 0,7 würde eine Verlängerung der Rippe einen zusätzlichen Kühleffekt bewirken. Bei einem Wert > 2 führt eine Verlängerung der zu keiner nennenswerten Erhöhung der Kühlwirkung.

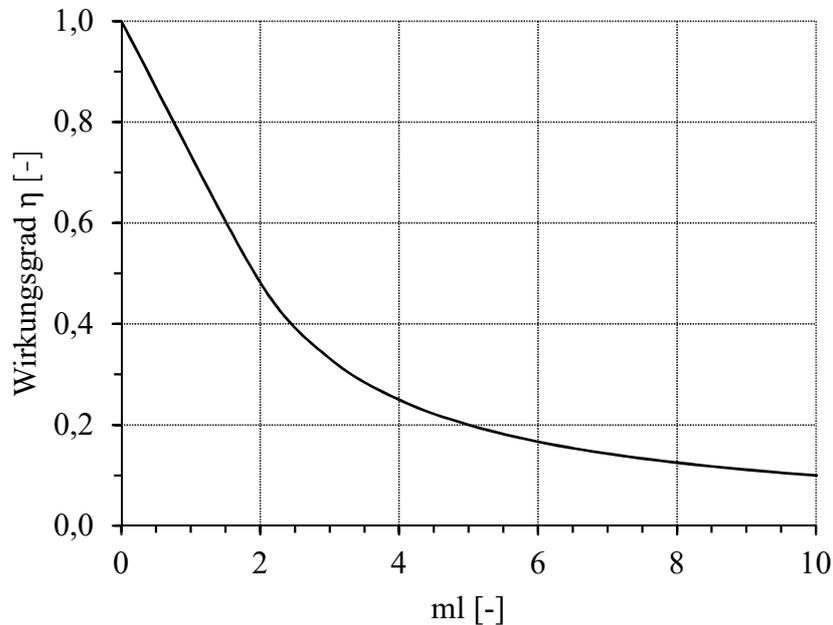


Abb. 3.34: Wirkungsgrad von Kühlnadeln in Abhängigkeit von der Geometrie [73]

3.6.2.3 SHAPE-Optimierung von zellulären Kühlstrukturen

Der allgemeine Ablauf einer umfassenden Optimierung der Kühlgeometrie (SHAPE) ist in Abb. 3.35 dargestellt. Ersichtlich ist, dass für eine derartige Anwendung mehrere Disziplinen ineinandergreifen müssen, um ein solides und industriell verwertbares Design zu erhalten. Zwei Kernelemente sind einerseits die Formoptimierung der Kühlstrukturen für den Wärmetransport und andererseits die Optimierung dieser Strukturen für die Aufnahme der betriebsbedingten mechanischen Belastungen. Die allgemeine Optimierung einer Kühlnadel wurde von Kraus et. al. [8] erläutert. Eine optimale Kühlgeometrie ist eine parabelförmige konkave Kontur (vgl. Abb. 3.32) mit dem Scheitelpunkt am Ende der Nadel. [8, 132]



Abb. 3.35: Themenschema für die Entwicklung von additiv gefertigten Hochleistungskühlereinsätzen für den Werkzeugbau

Für die geometrische Optimierung von konkav-parabolischen Kühlstrukturen wurde von unter anderem von Kraus et. al. [8] einerseits ausgehend von einem gewünschten Zielvolumen und andererseits ausgehend von einer gewünschten Kühlleistung (spezifische Wärmestromdichte ist gegeben) ein Formalismus für die Bestimmung optimaler Abmessungen abgeleitet (Gl. 3.34 und Gl. 3.35).

$$d_o = 1,175 * \left(\frac{\dot{q}_b^2}{\alpha \lambda T_b^2} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 3.34}$$

$$l_o = 1,084 * \left(\frac{\dot{q}_b \lambda}{\alpha^2 T_b} \right)^{1/3} \quad \text{Gl. 3.35}$$

Hierbei stellen α und λ die Wärmeübergangszahl bzw. die Wärmeleitfähigkeit dar. Die von der Nadel abzuführende Wärme wird mittels \dot{q}_b an der Basis der Kühlgeometrie angegeben. Über den in Gl. 3.36 dargestellten Zusammenhang kann mit den spezifischen Eingabedaten z.B. für den Druckguss die abzuführende Wärme nach Gl. 3.36 bestimmt werden.

$$Q = m * c_p * T_b \quad \text{Gl. 3.36}$$

Die spezifische Wärmekapazität c_p einer AlSi12 Legierung liegt bei 900J/kgK. Die Schmelztemperatur beträgt 585°C mit einem Erstarrungsintervall von 12°C. Die letzte Variable stellt das Schussgewicht, also die verwendete Schmelze in kg dar. Unter der Annahme, dass ein 500g Bauteil aus AlSi12 bei einer Temperatur von 600°C hergestellt wird, ergibt sich für die abzuführende Wärme ein Wert von $Q=5,4kJ$. Beträgt weiter die projizierte Fläche der Kavität 0,25m² kann die für die Optimierung relevante spezifische Wärmestromdichte $\dot{q}_b = 21,6kJ/m^2$. Zusätzlich kann bei einer theoretischen Erstarrungsgeschwindigkeit von 12s eine Kühlleistung von $P_{Kühlung} = 450W$ bestimmt werden. Teilt man diese 450W auf 50 Kühlelemente (Nadeln oder Lamellen) auf, muss jedes Kühlelement eine Kühlleistung von $P_K^E = 9W$ übernehmen. Dies bedeutet weiter, dass sich unter der Annahme eines Wärmeübergangs von $\alpha_{Nadel} \cong 10^5 W/m^2K$ (siehe 3.6.2.1) sowie einer geforderten konkav parabolischen Nadelgeometrie der optimale Fußdurchmesser sowie die optimale Nadellänge nach Gl. 3.34 und Gl. 3.35 bestimmen lassen. Für den gegebenen Fall würde dies eine Nadellänge von $l_0 \cong 4mm$ und einen Fußdurchmesser von $d_0 \cong 6,5mm$ ergeben.

3.6.2.4 Optimiertes Design für eine Werkzeugkühlung

Mattheck et. al. [17, 19, 22, 23] zeigte unter anderem, dass parabolisch-konkave Querschnittsübergänge die besten Ergebnisse hinsichtlich Spannungsminimierung liefern. In der Natur findet man ein derartiges Wachstum bei Bäumen. Baumgabeln weisen eine trajektorisch gezogene Basis auf, um die auftretenden Spannungen zu minimieren. Basierend auf dieser theoretischen Untersuchung lassen sich Kriterien für das Design einer optimierten Hochleistungskühlung für den Werkzeugbau definieren.

1. Kühleinsätze mit hoher Wärmeleitfähigkeit für den Temperaturtransport
2. Möglichst großer Basisstrebendurchmesser (warme Seite)
3. Aufteilen des Querschnittes in Sub-Strukturen → Wurzelstruktur
4. Parabolisch-konkave Querschnittsveränderung für optimale Werkstoffausnutzung für die Wärmeleitung
5. Ausrichtung der Streben für bessere Aufnahme der mechanischen Belastungen parallel zur Kraftrichtung
6. Mindestquerschnitte für strukturelle Stabilität im Betrieb

3.6.3 Additive Fertigung im Werkzeugbau - Kühlung II

Neben dem direkten Einsatz von Gitterstrukturen als Wärmeleitelemente zur Erhöhung der relativen Kühlfläche, können Gitter- oder Zellstrukturen auch zur Minimierung von Thermospannungen verwendet werden. Während des Druckguss treten speziell am Werkzeug große Temperaturgradienten auf. Am Beginn eines Zyklus wird die flüssige Metallschmelze, bei Aluminium im Bereich von 700°C, in das Werkzeug „gedrückt“. Für eine vollständige Erstarrung bleiben in der Regel nur wenige Sekunden, sodass es notwendig ist, die Werkzeuge zu kühlen. Dadurch entstehen an der Oberfläche binnen kurzer Zeit große Temperaturunterschiede die vom Werkzeug aufgenommen werden müssen. Dieser Effekt ist auch als thermische Ermüdung bekannt. Die Ursache für die thermische Ermüdung und schlussendlich dem Versagen eines Werkzeuges (Druckgusswerkzeug) ist die temperaturdifferenzabhängige Induzierung einer Thermospannung nach Gl. 3.37.

$$\sigma_{th} = \frac{\alpha * E}{1 - \nu} * \Delta T \quad \text{Gl. 3.37}$$

Zu erkennen ist, dass eine Reduktion des Elastizitätsmoduls E zu einer direkten Verringerung der Thermospannungen führt. Eine Evaluierung des Werkstoffes hinsichtlich thermischer Ermüdung ist über den Thermoschockparameter (TSP) R_s (Gl. 3.38) möglich. Dieser Parameter ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes gegen rasche Temperaturwechsel. [43, 133, 165]

$$R_s = \lambda * \sigma_{krit} * \frac{1 - \nu}{\alpha * E} \quad \text{Gl. 3.38}$$

Je größer dieser Wert ist, desto besser eignet sich der Werkstoff für eine gegebene Temperaturwechselbelastung. Konventionelle Werkzeuge sind in der Regel bis auf ein paar Bohrungen für die Kühlung als solide und massive Blöcke ausgeführt. Dies bietet weiter einen erheblichen Angriffspunkt für die Temperatur um weitreichende Temperaturfelder und damit beträchtliche Thermospannungen auszubilden.

Zelluläre Strukturen und vor allem Gitterstrukturen lassen sich in weiterer Folge für die Reduktion von auftretenden Thermospannungen im Werkzeug verwenden. Hierfür wird eine solide Außenhülle für die Aufnahme der Prozesskräfte entwickelt. Diese Außenhülle

wird mittels Gitterstrukturen im inneren gestützt. Da Gitterstrukturen einen geringeren Elastizitätsmodul besitzen als der solide Grundwerkstoff wird durch deren Verwendung auch die auftretende Thermospannung reduziert (siehe Gl. 3.37). Kapitel 3.6.2 zeigt, dass Gitterstrukturen durchaus als Kühlnadeln verwendet werden können, jedoch ist eine sehr geringe Temperatureindringtiefe in die Streben und ein damit verbundener geringer Wirkungsgrad als wesentlicher Nachteil anzuführen. Werden die Gitterstrukturen nur als „elastischer Puffer“ im Hintergrund verwendet kann eine zusätzliche Spülung des Hohlraumes mit einem Kühlmedium jedoch unterstützend verwendet werden.

3.6.4 Additive Fertigung im Werkzeugbau - Kühlung III

Neben der Volumenspülung ist auch eine Implementierung von Wärmerohren (Heatpipe oder Thermosiphon) über die additive Fertigung möglich. Hierfür werden in die massive Hülle schmale Kanäle eingearbeitet durch die ein Kühlmedium an eine kalte Stelle (Kondensationszone) geführt werden kann. Diese Kanäle sind im verschlossenen Zustand hermetisch gekapselt und transportieren die Wärme von der Verdampfungszone (solide Hülle – Kavität) hin zur Kondensationszone. Die hohe Wärmeleitfähigkeit resultiert aus dem Arbeitsprinzip derartiger Wärmerohre. Hierbei wird in der warmen Zone das Arbeitsfluid verdampft. Der gesättigte Dampf wird aufgrund des Druckgefälles im Rohr in die kalte Zone gepumpt. Hier kondensiert der Dampf wieder und gibt die gespeicherte Wärmeenergie ab. Abschließend wird die Flüssigkeit durch die Kapillarwirkung wieder in die warme Zone gepumpt. Für die Auslegung derartiger Wärmerohre wird die durch poröse Materialien oder zelluläre Strukturen hervorgerufene Kapillarwirkung den Druckverlusten im inneren der Wärmerohre gegenübergestellt. Der gesamte Druckverlust setzt sich aus den Verlusten durch den Flüssigkeitstransport, den Dampftransport und den Verlusten durch die Gravitation zusammen (Gl. 3.39).[149, 162]

$$\Delta P_c \geq \Delta P_{lf} + \Delta P_{vf} + \Delta P_g \quad \text{Gl. 3.39}$$

Der Kapillardruck wird über die Young-Laplace Gleichung nach Gl. 3.40 bestimmt.[68, 162]

$$\Delta P_c = \sigma * \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{Gl. 3.40}$$

Hierbei stellen r_1 und r_2 die Meniskusradien und σ die Oberflächenspannung der Flüssigkeit dar. In zylindrischen Kapillaren sind r_1 und r_2 identisch ($r_1 = r_2 = R$) und können über den Kapillarradius r_e und dem Benetzungswinkel θ bestimmt nach Gl. 3.41 werden. [13, 68, 123, 149, 162]

$$R = \frac{r_e}{\cos \theta} \quad \text{Gl. 3.41}$$

Die Flüssigkeiten, die für den Wärmetransport benötigt werden, werden über die Merit-Zahl M_e [W/m^2] (Gl. 3.42) charakterisiert. Hierbei stellt eine hohe Merit-Zahl, ein für den Wärmetransport bei einer gegebenen Arbeitstemperatur geeigneteres Medium dar. [13, 133]

$$M_e = \frac{\sigma_l * \Delta H_{v,l}}{\nu_l} \text{ bzw. } \frac{\rho_l * \sigma_l * L_v}{\mu_l} \quad \text{Gl. 3.42}$$

σ_l [N/m] steht für die Oberflächenspannung, ΔH_v [J/mol] für die Verdampfungsenthalpie und ν [Pas] für die kinematische Viskosität des Arbeitsmediums in den Wärmerohren. In konventionellen Heatpipes wird für die Gewährleistung des Kappilareffektes ein Drahtgeflecht oder ein (gesinterter) poröser Werkstoff in das Rohr integriert.

Tab. 3.14: Werkstoffe für Wärmerohre [13, 133]

Werkstoff -nummer	Bezeichnung	Festigkeit R_m [MPa]	Wärme- leitfähigkeit λ [W/mK]	Wärme- kapazität C_p [J/kgK]	Wärme- ausdehnungs- koeffizient $\alpha \times 10^{-6}$ [$1/\text{K}$]	Ref.
1.4404	X2 CrNiMo 18-9	500-700	15	500	16	[158]
1.7335	13 CrMo 44	450-600	38	545	11,1	[155]
3.7065	Ti 99,4	550-685	18	540	9,1	[157]
1.0308	St35	340-480	54	461	11,1	[156]
2.0872	CuNi10Fe	300-480	50,2	380	17,0	[38]
1.4541	X10 CrNiTi 18-9	500-720	15	500	16,0	[159]
1.2709	X3 NiCoMoTi 18-9-5	1200 (>2000)	15-20	450	10,1	[160]

Diese interne Struktur kann mittels additiver Fertigung über zelluläre Strukturen realisiert werden. Für die Auslegung von Heatpipes und Thermosiphone sind hauptsächlich das Fluid, der Rohrwerkstoff und die interne Geometrie (Kapillar- bzw.

Zellularstruktur) maßgebend. Herkömmliches Wasser (H_2O) wird neben Ammoniak (NH_3) häufig als Arbeitsfluid für Temperaturbereiche ab $0^\circ C$ bis ca. $200^\circ C$ eingesetzt. Gängige Werkstoffe für Wärmerohre sind in Tab. 3.14 dargestellt. Zusätzlich zum Kapillareffekt der Gitter können diese auch zusätzliche Beschichtungen erhalten um die Benetzung des Gitters und damit auch die Kapillarwirkung zu verbessern. [94] Alle gängigen Werkstoffe bieten sich für eine additive Verarbeitung über den L-PBF Prozess aufgrund des sehr geringen C-Gehaltes an.

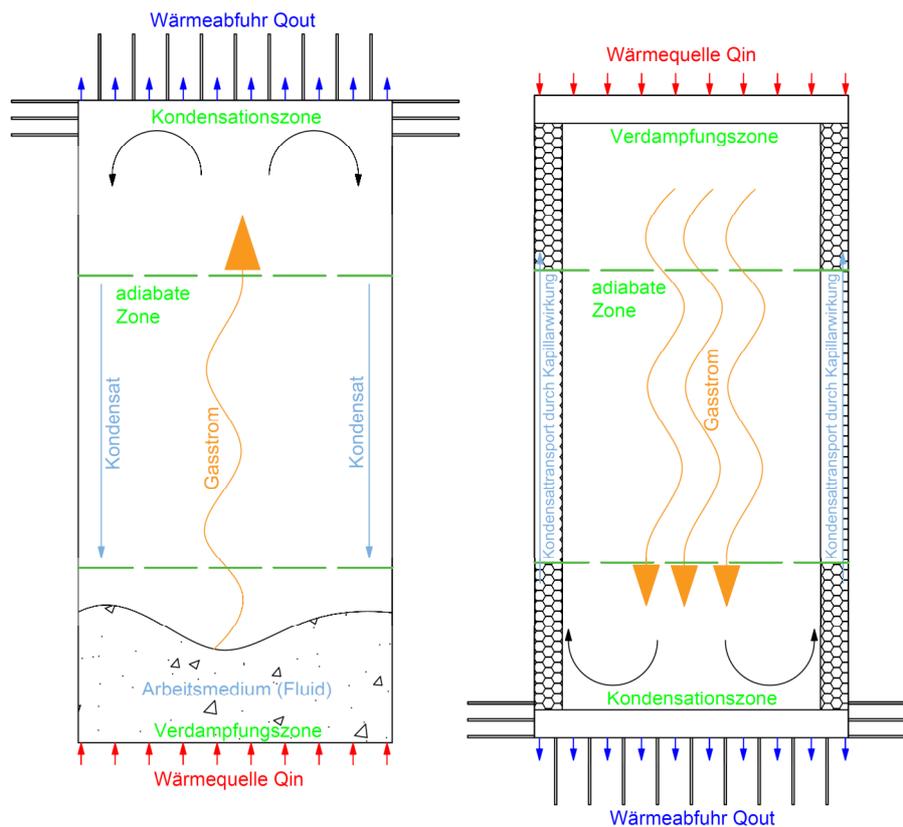


Abb. 3.36: Darstellung der Wirkungsweise eines Thermosiphons (links) und einer Heatpipe (rechts). [133]

Die Wirkungsweise beider Designvarianten, Heatpipe und Thermosiphon, sind in Abb. 3.36 dargestellt. Grundsätzlich wird dem Thermosiphon eine Gravitationsabhängigkeit und der Heatpipe eine Kapillarwirkungsabhängigkeit zugeschrieben. Der Thermosiphon besitzt aufgrund seiner Funktionsweise eine vordefinierte Position der Wärmequelle (unten) sowie eine definierte Position des Kühlbereiches (oben). Bei einer Heatpipe kann der Fluidtransport, bei entsprechender Auslegung der porösen Transportschicht auch gegen die Schwerkraft stattfinden. Dies ermöglicht eine weitere Anwendung von Kühlsystemen in additiv gefertigten Werkzeugen oder Werkzeugeinsätzen.

4 Methodendurchführung

4.1 Mechanische Kennwerte einer rhombisch-dodekaedrischen Einheitszelle

Für die Beschreibung der mechanischen elastischen Eigenschaften von zellulären Strukturen bedient man sich der Mechanik und Festigkeitslehre von Stäben und Fachwerken. Nach den Untersuchungen von M. Ashby und L. Gibson ist der primäre Verformungsmechanismus die Biegung der einzelnen Streben des Fachwerkes [10, 14]. Somit kann für die analytische Bestimmung des Elastizitätsmoduls ein einzelner Stab der Einheitszelle (Abb. 4.1) herangezogen werden.

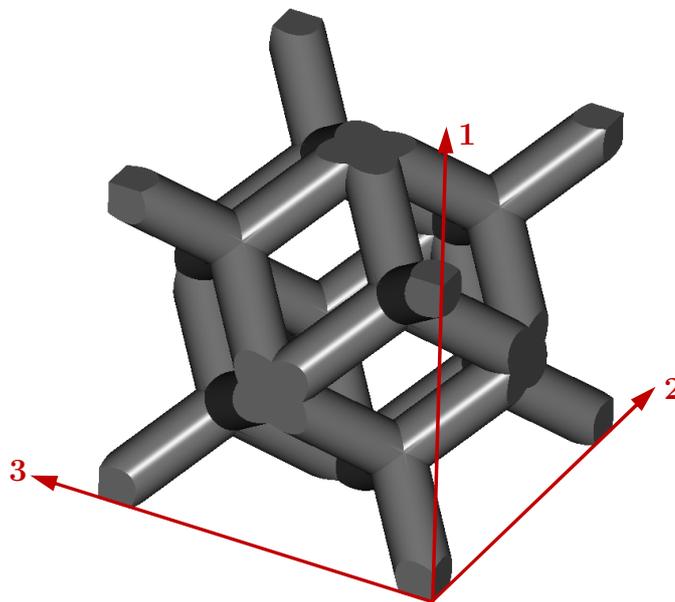


Abb. 4.1: Rhombisch-Dodekaedrische Einheitszelle

Mittels Satz von Castigliano (Gl. 4.1) wird über die gespeicherte Verformungsenergie die lastabhängige Verschiebung δ in eine definierte Verschiebungsrichtung ermittelt (Abb. 4.2).

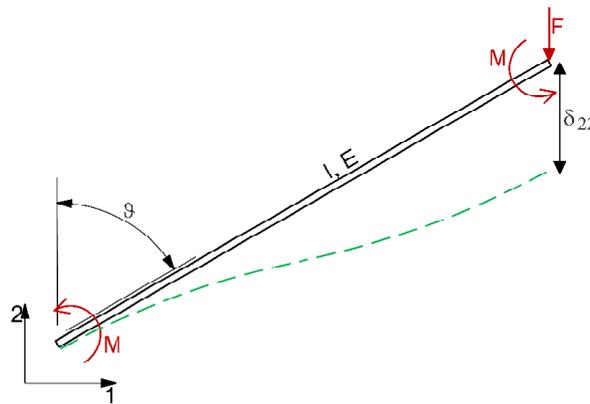


Abb. 4.2: Systemskizze eines Stabes der rhombisch-dodekaedrischen Einheitszelle

Unter der Voraussetzung einer ausreichenden Schlankheit der Stäbe (relative Dichten <30%) kann der Querkraft-Schubeinfluss vernachlässigt werden. [16]

$$\delta_{B+N,F} = \frac{\partial}{\partial F} \left(\frac{1}{2} \int_0^l \frac{M(x)^2}{EI} + \frac{N(x)^2}{EA} dx \right) \quad \text{Gl. 4.1}$$

Ergebnis ist die Verschiebung des Stabendpunktes in Krafrichtung mit dem Ausdruck $\delta = (F \sin^2 \vartheta l^3) / 12EI + (F \cos^2 \vartheta l) / EA$. Hierbei ist l die Stablänge, F die Belastung pro Stab ($F_{Stab} = F_{x,y,z} / 8$) und ϑ die Neigung des Stabes ($54,73^\circ$). Für die Bestimmung der auftretenden Zellspannung ist eine repräsentative Fläche A Gitterstruktur notwendig. Für die Berechnung wird die minimale reale Querschnittsfläche der Zelle verwendet (Abb. 4.3).

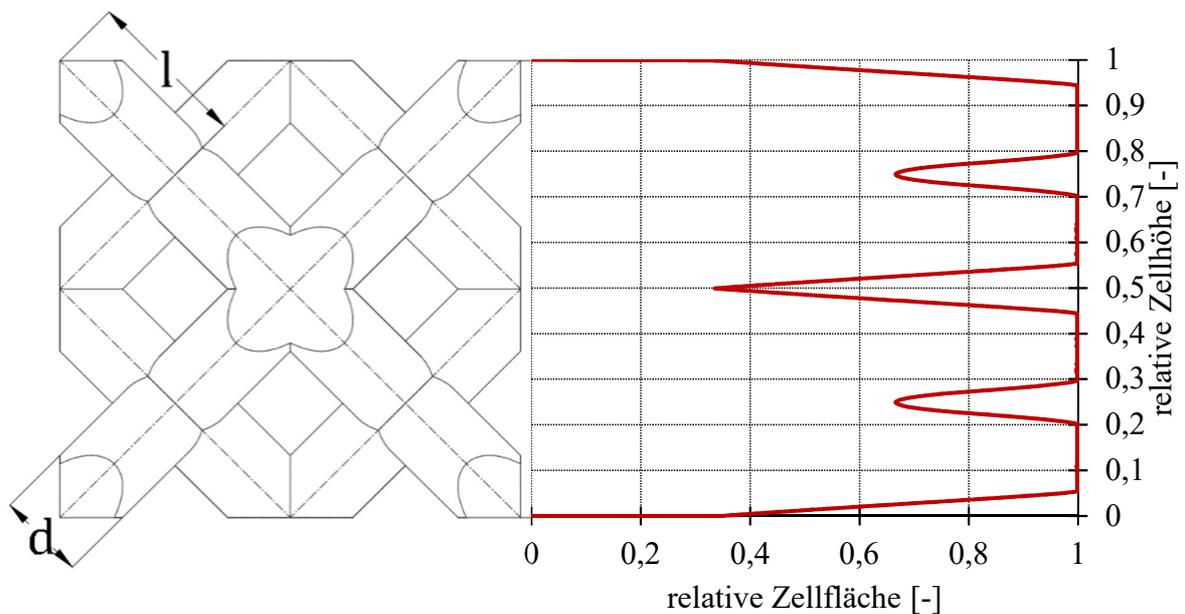


Abb. 4.3: Verlauf der relativen Querschnittsfläche über die Zellhöhe

Die minimale Querschnittsfläche bei rhombisch dodekaedrischen Einheitszellen ist nach Abb. 4.3 an den Außenseiten sowie in der Mittelebene der Zelle zu finden. Die Fläche wird über den allg. Zusammenhang $\sigma = F/A$ für die Spannungsberechnung herangezogen. Für die Bestimmung des zellulären Elastizitätsmoduls kann die zuvor bestimmte Verschiebung δ weiter über das Hook'sche Gesetz $\sigma = E * \varepsilon$ mit der Spannung im minimalen Querschnitt in Verbindung gebracht werden. Ergebnis ist der formelmäßige Zusammenhang zwischen den Gitterparametern (l , d und ϑ) für die Berechnung des relativen Elastizitätsmoduls der Struktur (Gl. 4.2).

$$\frac{E^*}{E_s} = \frac{3\pi d^2}{(64l^2 \sin^2 \vartheta + 48d^2 \cos^2 \vartheta) * \arctan\left(\frac{1}{\cos \vartheta}\right)} \quad \text{Gl. 4.2}$$

Für die Evaluierung der Anwendbarkeit von Gitterstrukturen können unterschiedlichste Untersuchungsmethoden herangezogen werden. Ein wichtiger Vertreter ist der konventionelle Stauchversuch. Mit dieser Methode wird ein umfassendes Bild der Kompressionseigenschaften der jeweiligen untersuchten Gitterstrukturen erstellt.

4.2 Praktische Bestimmung von Gittereigenschaften

Für die praktische Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften werden Stauchversuche auf einer hydraulischen 500kN Presse durchgeführt. Die Abmessungen der quaderförmigen Gitterproben sind in Abb. 4.4 dargestellt.

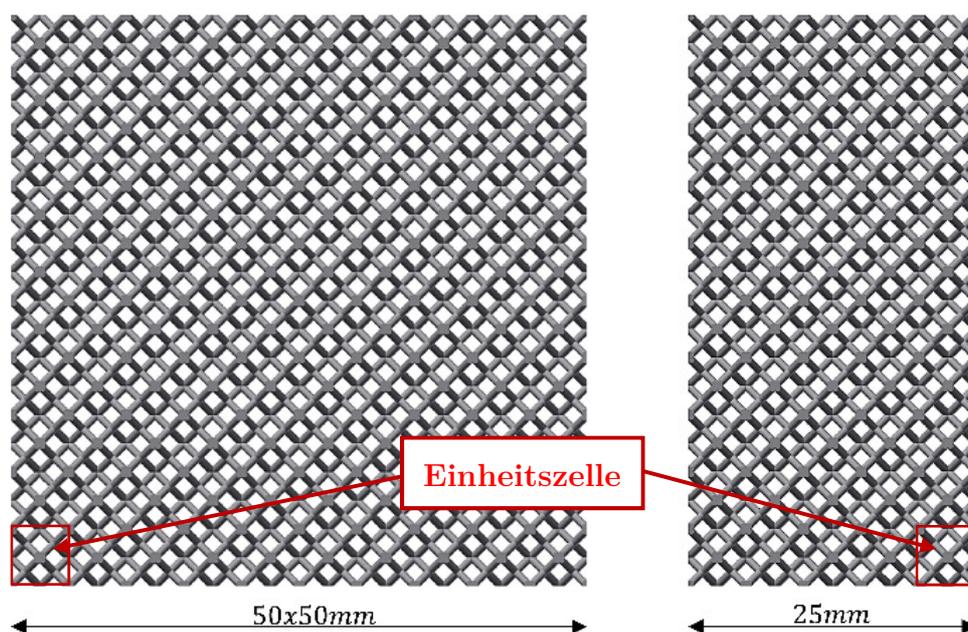


Abb. 4.4: Stauchprobengeometrie: Einheitszellengröße 5mm, $d=0,786\text{mm} - 1,039\text{mm}$, $l=2,165\text{mm}$, Zellenanzahl: $10 \times 10 \times 5$

Der Versuchsumfang umfasst vier unterschiedliche relative Dichten (20%, 25%, 30% und 35%) sowie eine konstante Einheitszellgröße von 5mm. Die Variation der relativen Dichte erfolgt über den Strebendurchmesser der Einheitszelle. Die Proben werden aus dem Werkstoff AlSi10Mg mittels einer L-PBF Anlage (EOS M280) mit den Standardparametern hergestellt. Im Anschluss wird die Oberfläche mittels Strahlkabine und Stahlschrot von anhaftenden Pulverrückständen befreit sowie eine Wärmebehandlung bei 300°C für 1h durchgeführt.

4.2.1 Deformationsmechanismus

Ähnlich wie beim konventionellen Stauchen, bildet sich entlang der größten Schubspannung eine Zone maximaler Umformung. Dieses Phänomen ist allgemein unter „Schmiedekreuz“ bekannt. Charakteristisch für dieses Schmiedekreuz ist der hohe Umformgrad innerhalb dieser Zone. Im Gegensatz dazu, bildet sich an den Kontaktstellen zwischen Werkzeug und Gitter ein „Keil“ mit einem wesentlich geringeren Umformgrad aus. Der Gitterstauchversuch zeigte ebenfalls die Ausbildung dieser Deformationszonen (Abb. 4.5a-h). Wesentlicher Unterschied zum konventionellen Stauchen ist, dass bei den Gitterstrukturen die Umformung in diesen Zonen schrittweise abläuft.

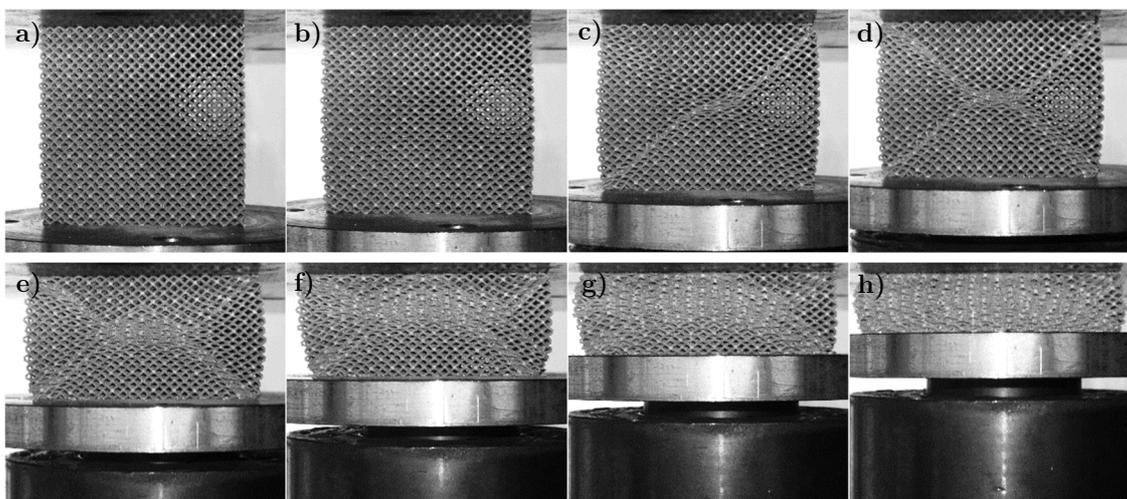


Abb. 4.5: Deformationssequenz beim Stauchen eines Gitterwürfels (50x50x25mm) mit einer relativen Dichte von 25%. a) Ausgangszustand; b) Ausbauchen des Gitterkörpers ohne Umklappen; c) Umklappen der ersten Gitterreihe; d) Umklappen der zweiten Gitterreihe; e) Umklappen und Verdichten; f) weiteres Umklappen und Verdichten; g) Verdichten; h) vollständig verdichtet

Daher kann die Umformung von Gitterstrukturen in definierte Bereiche eingeteilt werden, die auch im zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramm zu finden sind.

1. Ausbauchen der Gitterstruktur unter Einhaltung der strukturellen Integrität
2. Umklappen des ersten Strebenverbundes entlang der größten Schubspannung
3. Umklappen des zweiten Strebenverbundes entlang der größten Schubspannung
4. Verdichten des Zentrums und weiteres Umklappen
5. Verdichten

4.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Stauchversuche sind in aufbereiteter Form in Abb. 4.6 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist eine Steigerung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der relativen Dichte der Gitterstrukturen. Zusätzlich kann aus den Spannungsverläufen der Versuchsdaten der zugehörige Elastizitätsmodul bestimmt werden (Tab. 4.1). Wichtig für einen Vergleich der analytischen mit den praktischen Werten ist die Verwendung derselben Querschnittsfläche für die Auswertung der Messwerte.

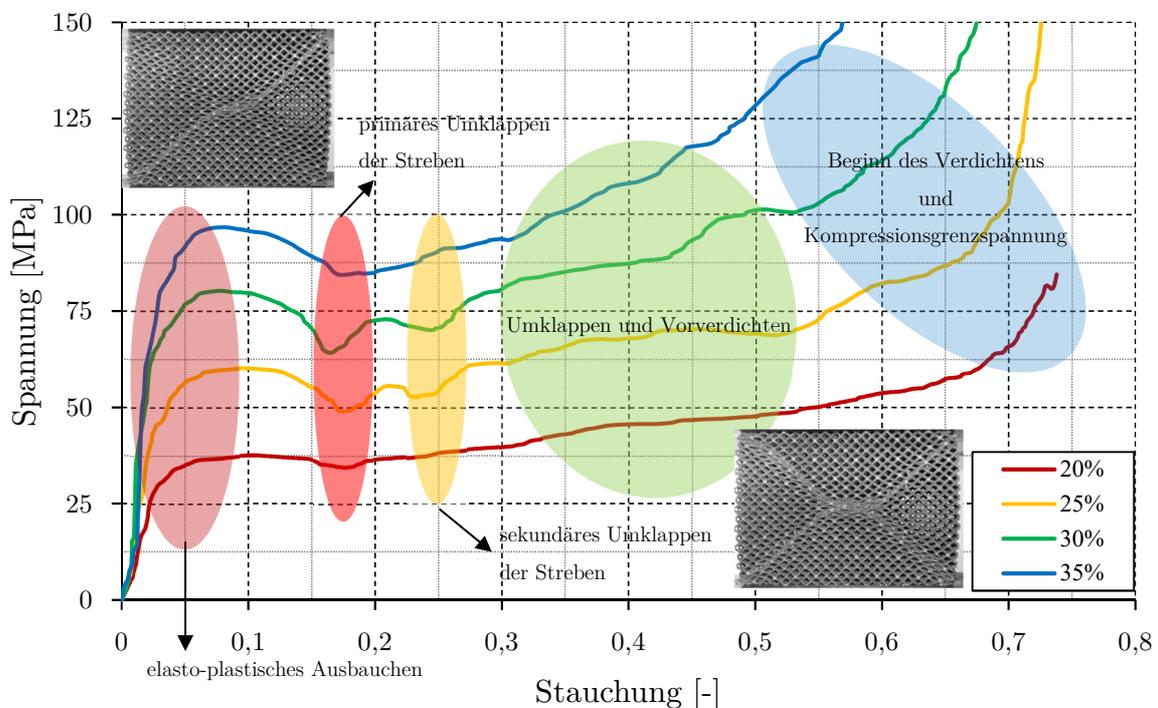


Abb. 4.6: Spannungsverlauf der Stauchversuche von Proben mit unterschiedlichen relativen Dichten. (Angegebene Spannungswerte wurden auf die reale Querschnittsfläche der Einheitszelle umgerechnet)

Der Elastizitätsmodul wird im elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes zwischen 0,0005% und 0,002% Dehnung bestimmt. Der Elastizitätsmodul der jeweiligen Gitterprobe entspricht der Steigung der Ausgleichsgeraden in diesem Bereich. Durch diese Versuchsreihe werden für eine rhombisch-dodekaedrische Einheitszelle die Parameter für eine durchgängige Charakterisierung des Elastizitätsmoduls (Abb. 4.7) nach dem Potenzansatz von M. Ashby und L. Gibson [100] bestimmt. Ein weiterer charakteristischer mechanischer Kennwert von zellulären Strukturen ist die von der relativen Dichte abhängige Plateauspannung (Abb. 4.8). Diese bildet sich aus der durchschnittlichen Spannungsverteilung zwischen dem elastischen Anstieg und der Kompressionsgrenzspannung.

Tab. 4.1: Ergebnisse der Stauchversuche für Gitter mit unterschiedlichen relativen Dichten

$\frac{\rho^*}{\rho_s}$	d [mm]	l [mm]	$\frac{E^G}{E_s}$	E^G [MPa]	E_{ab} [J/cm ³]	ξ [$\sqrt{\text{MPa cm}^3/\text{g}}$]	σ_{pl} [MPa]
0,2	0,786	2,165	0,030	2085	29,24	84,56	60
0,25	0,879	2,165	0,036	2543	52,51	74,71	90
0,3	0,963	2,165	0,044	3117	64,84	68,93	120
0,35	1,039	2,165	0,061	4269	74,11	69,14	150

Das Ende des elastischen Anstieges ist in der Regel durch das erste Spannungsmaximum im Spannungs/Dehnungs Diagramm definiert. Die Kompressionsgrenzspannung gibt jenen Punkt an, ab welchen ein steiler Anstieg der Spannung auftritt → Verdichtungsbeginn.

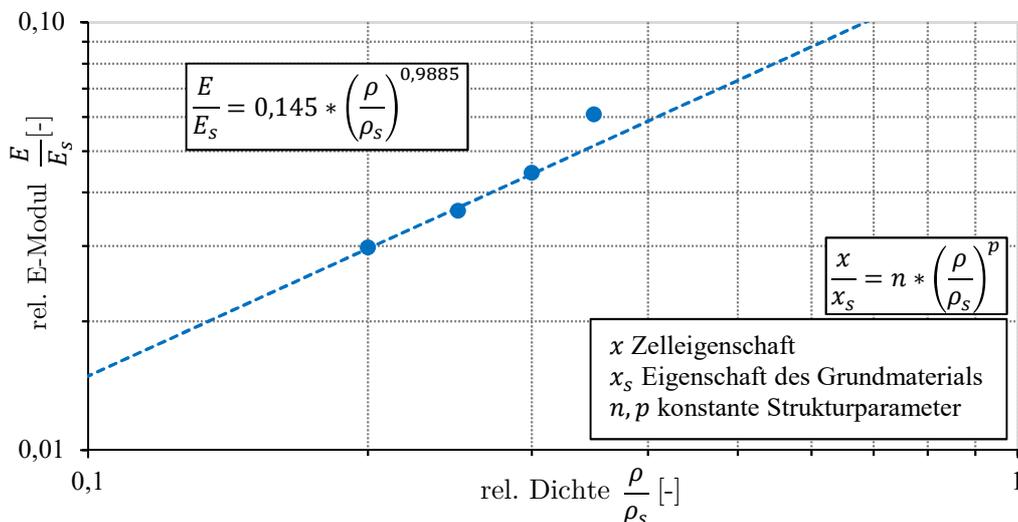


Abb. 4.7: Bestimmung der Parameter n und p für den Elastizitätsmodul.

Betrachtet man weiter die Energieabsorption, steigt diese analog zu den Festigkeiten der Probegitter. Mit zunehmender relativer Dichte nimmt auch die Energieabsorption pro Volumen zu (Tab. 4.1).

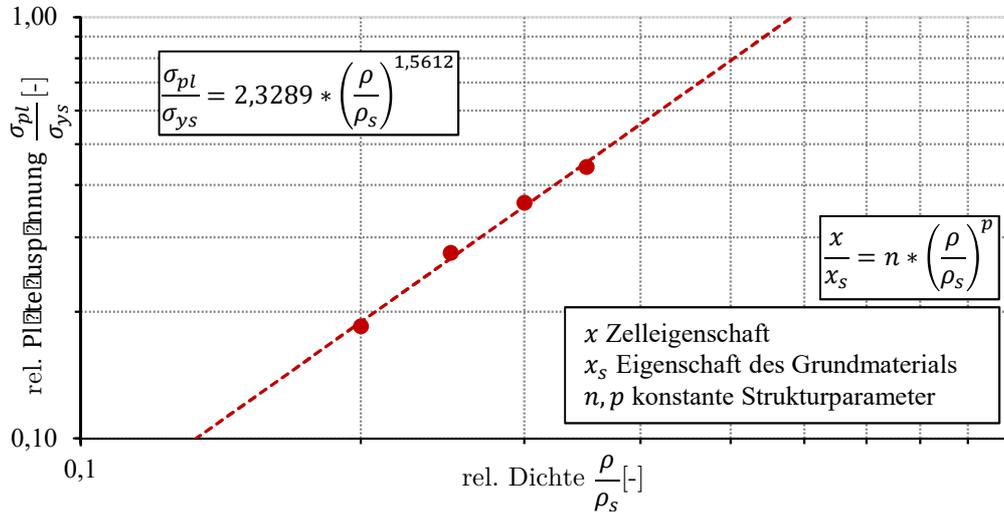


Abb. 4.8: Bestimmung der Parameter n und p für die Plateauspannung.

Die guten Crasheigenschaften von mit Aluminiumschaum gefüllten Crashboxen (mit unterschiedlicher relativer Dichte) wurde von Lanard et. al. [7] mittels Simulation und praktischen Untersuchungen bestätigt. Durch die Materialeffizienz werden, wie bereits beschrieben, unterschiedliche Werkstoffe oder Strukturen verglichen. Im vorliegenden Fall nimmt die Materialeffizienz ab, da für die Strukturen mit höherer relativer Dichte mehr Material benötigt wird.

4.2.3 Vergleich mit den analytischen Ergebnissen

Abschließend werden die analytisch bestimmten Gittereigenschaften mit den Ergebnissen der praktischen Versuche verglichen (Abb. 4.9). Erkennbar ist eine Korrelation zwischen den jeweiligen Wertepaaren. Die Differenz der Wertepaare für 20-30% relativer Dichte ist auf die getroffenen Vereinfachungen, wie die Vernachlässigung des Querkraftschubes, zurückzuführen. Die Abweichung bei einer relativen Dichte von 35% ist auf den Anwendungsbereich des formalen Zusammenhangs (bis ca. 35% relative Dichte) nach Ashby zurückzuführen.

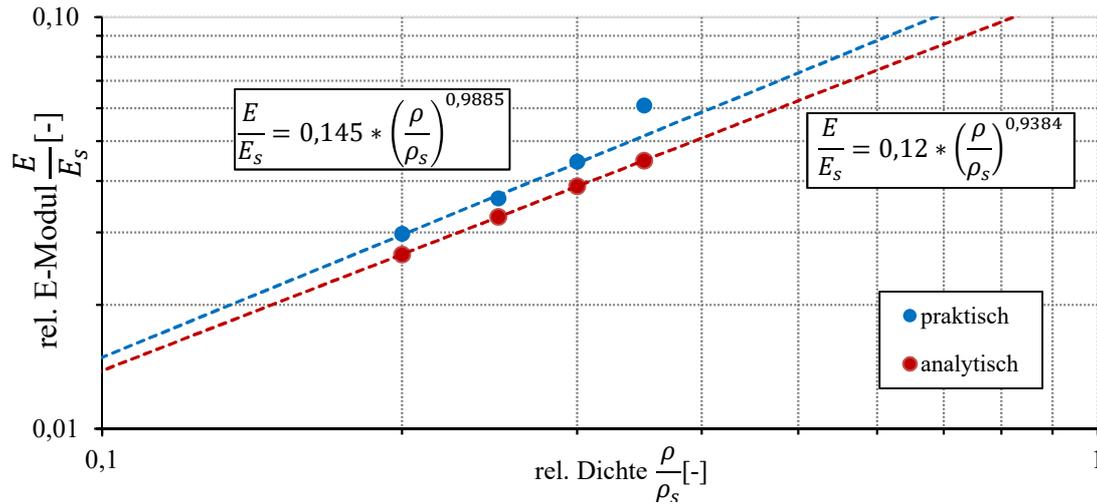


Abb. 4.9: Vergleich zwischen analytisch und praktisch bestimmten Gittereigenschaften.

4.3 LPCalcV0.1 – MatLab

Die Grundlage für dieses Programm ist die automatisierte Bestimmung von Gitterkennwerten für die Optimierung von mechanischen Bauteilen und die anschließende Fertigung mittels additiver Fertigungsverfahren. Abb. 4.10 zeigt die Oberfläche mit den Eingabefeldern sowie dem Ausgabefeld für die ermittelten Daten der Gitterstruktur. Dieses Programm beinhaltet neben dem eigenständig geschriebenen Programmcode auch Programmsegmente bereits zugänglicher Routinen aus der Benutzerbibliothek von Mathworks MatLab. Diese wurden angepasst und sind im vollständigen Programmcode (Kapitel 11) angeführt und vermerkt.

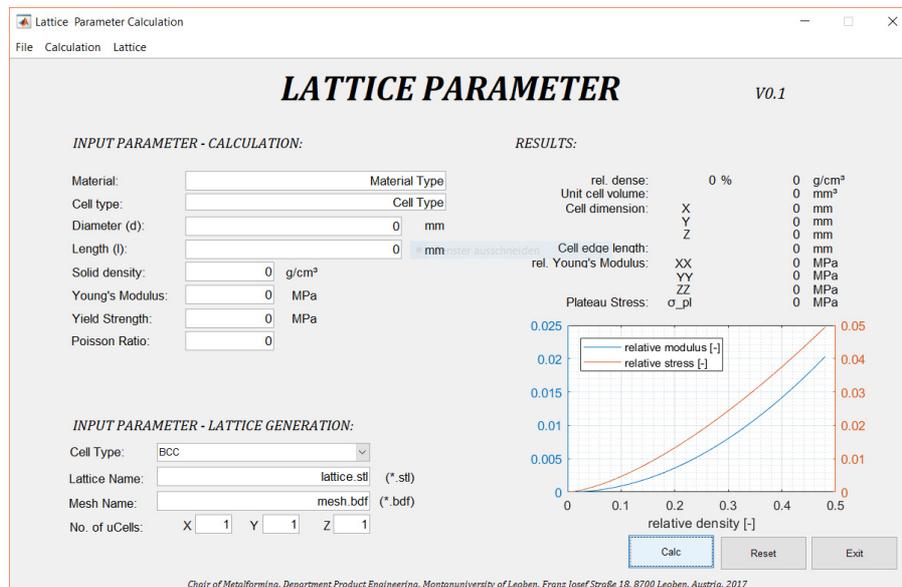


Abb. 4.10: Eingabemaske von LPCalcV0.1

4.3.1 Berechnung

Für die Berechnung der mechanischen Gitterkennwerte werden die analytischen (Kapitel 4.1) und praktischen Ergebnisse (Kapitel 4.2) sowie der Potenzansatz nach Ashby (Kapitel 3.4.1) verwendet. Das Blockdiagramm der Basissoftware ist in Abb. 4.11 dargestellt.

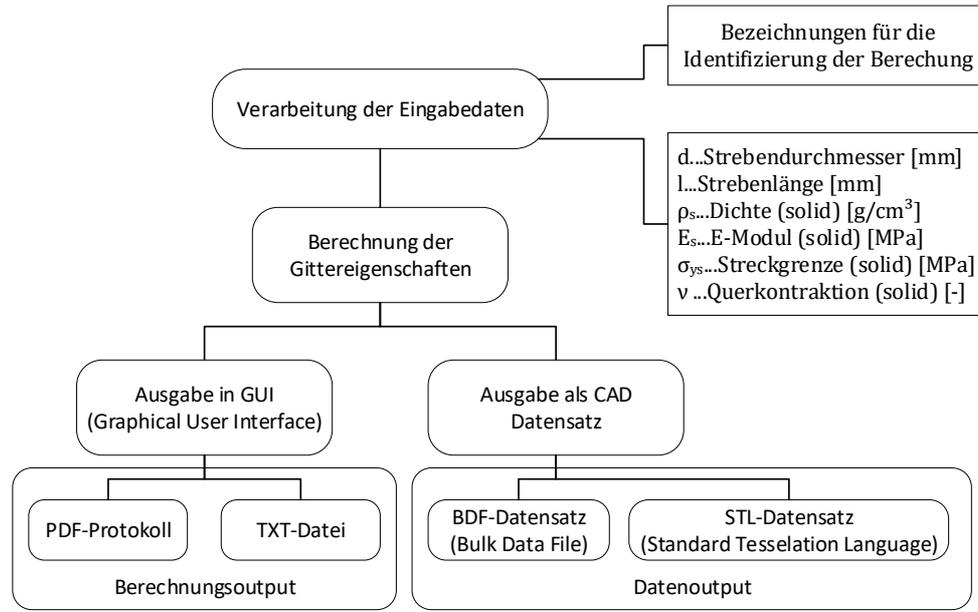


Abb. 4.11: Blockdiagramm von LPCalcV0.1

Die Eingabedaten umfassen die mechanischen Eigenschaften des Basiswerkstoffes (Elastizitätsmodul, Streckgrenze, Poisson-Zahl und Dichte), den Strebendurchmesser und die Strebenlänge der Gitterstruktur. Für die Ausgabe der Ergebnisse werden zusätzlich die Bezeichnungen für den Werkstoff und die Gitterstruktur benötigt. Der nächste Schritt ist die Auswahl des zu berechnenden Gitterstrukturtyps. Implementiert sind folgende Einheitszellen:

- rhomboedrisch dodekaedrische AlSi10Mg-Zellen (WBH für 1h bei 300°C)
- Würfel (primitiv)
- Rhombicuboctaeder
- verzweigter Würfel
- kubisch raumzentriertes Gitter (bcc)

Die Auswahl des Gittertyps erfolgt über ein Dropdown Menü innerhalb des „Lattice Generation“ Abschnittes. Neben der Gittertypauswahl sind hier auch die Bezeichnungen für die zu erzeugenden CAD (STL) und FEM (BDF) Datensätze einzugeben.

4.3.2 Berechnung der Gitterkennwerte

Die Bestimmung des E-Moduls sowie der Plateauspannung der praktisch untersuchten Gitterstrukturen, erfolgt über den bereits beschriebenen Potenzansatz nach Ashby. Hierfür werden die Konstanten aus den Versuchen ermittelt und in die Berechnung implementiert. Die jeweiligen korrespondierenden Werte werden nach der Auswahl im Dropdownmenü automatisch zugewiesen.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die Werte für das rhomboedrisch-dodekaedrische Gitter (n und p) die Versuchswerte einer AlSi10Mg (AM) Legierung nach einer WBH von 1h bei 300°C darstellen. Da sich die mechanischen Eigenschaften stark mit einer Wärmebehandlung ändern, sind natürlich für alle neuen Gefügestände Parameteruntersuchungen durchzuführen und die Parameter zu bestimmen.

Neben der Berechnung der mechanischen Kennwerte werden auch die Funktionswerte der relativen Spannung und des relativen Elastizitätsmoduls für unterschiedliche relative Dichten in einem Diagramm im Ergebnisbereich dargestellt. Durch diese Darstellung sind auch schnelle Aussagen über die Eigenschaften anderer relativer Dichten derselben Gitterstruktur möglich.

```
function [ E_lattice ] = lattice_young(rel_dense,young_solid,k,p,ctype,d,l,nu_solid)
%Calculation of the lattice young's modulus
G_solid=(1/(2*(1+nu_solid)))*young_solid;

if strcmpi(ctype,'rhomb_dod') % rhomboedric dodecahedral cell
    E_lattice=young_solid*k*rel_dense^p;
elseif strcmpi(ctype,'BCC') % body centred
    E_lattice=(young_solid*4*sqrt(3))/((1^2/(pi*(d/2)^2)+(1^4/(2*pi*(d/2)^4)));
elseif strcmpi(ctype,'cube') % cube cell
    E_lattice=young_solid*pi*((d/(2*1))^2);
elseif strcmpi(ctype,'rhomb_cub_oct') % rhombicuboctahedral cell
    a=4+(108*(d/(2*1))^2)+(207*(d/(2*1))^4)+(81*(d/(2*1))^6)+...
        ((G_solid/young_solid)*((2/3)+(19*(d/(2*1))^2)+(45*(d/(2*1))^4)+(18*(d/(2*1))^6)));
    b=8+(70*(d/(2*1))^2)+(105*(d/(2*1))^4)+(27*(d/(2*1))^6)+...
        ((G_solid/young_solid)*((4/3)+(13*(d/(2*1))^2)+(23*(d/(2*1))^4)+(6*(d/(2*1))^6)));
    c_1=a/b;
    E_lattice=((young_solid*4*pi*(d/(2*1))^2)/(3*(1+sqrt(2))))*(c_1);
elseif strcmpi(ctype,'trunc_cube') % truncated cube cell
    E_lattice=((young_solid*2*pi*(d/(2*1))^2)/(sqrt(2)+1))*((1+(9*(d/((2*1))^2)))/...
        (5+(21*(d/((2*1))^2))));

else
    error('Cell type not recognised for Young's Modulus calculation!')
end

end
```

Abb. 4.12: Matlab Codesegment für die E-Modul Bestimmung.

4.3.3 Ausgabe der berechneten Gitterkennwerte

Die berechneten mechanischen Gitterkennwerte werden im Ausgabebereich zahlenmäßig ausgegeben. Zusätzlich wird ein Diagramm für unterschiedliche relative Dichten erzeugt. Dargestellt werden der relative Elastizitätsmodul sowie die relative Plateauspannung in Abhängigkeit der relativen Dichte. Diese Darstellung bietet eine Schnellauswahl für Gitterstrukturen mit beliebiger relativer Dichte und einer geforderten maximalen Plateauspannung oder einer minimalen Steifigkeit. Zusätzlich können die berechneten Werte im PDF oder TXT Format exportiert werden.

4.3.4 STL-Datensatz - Export

Für den berechneten Gittertyp kann die Einheitszelle als STL Datensatz erzeugt und ausgegeben werden (Abb. 4.13). Dieser Datensatz muss vor der Weiterverarbeitung mit einem beliebigen STL-Editor geschlossen (wasserdicht) werden.

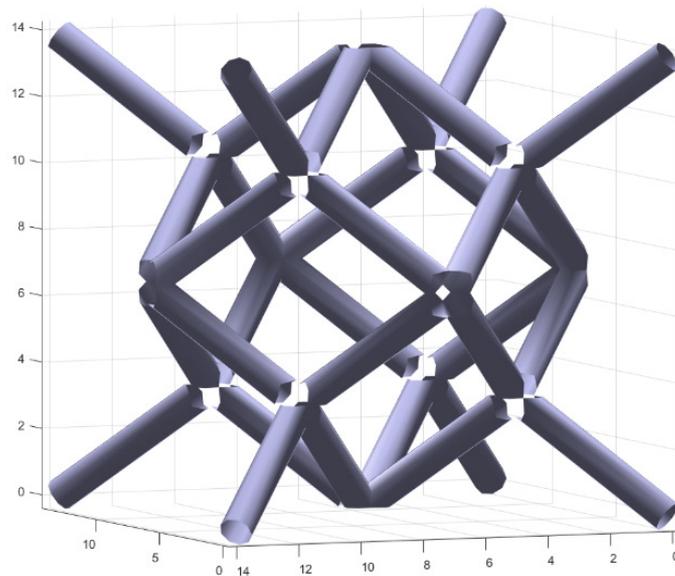


Abb. 4.13: STL Datensatz einer rhomboedrisch dodekaedrischen Einheitszelle.

4.3.5 BDF-Datensatz – Export

Das BDF Format (Bulk Data Input File) wird in der FE Berechnung in Verbindung mit einem Nastran Solver verwendet. Dieses Format beinhaltet die für die Berechnung notwendigen Daten für Knoten, Elemente, Kräfte usw. Die Gitterstrukturen werden über einen Algorithmus (Abb. 4.14) im BDF Format exportiert.

```

function [fid_nas]=initialise_FE(FEvars,nodes_unique,element_radius, nu, E, rho)
fid_nas=fopen(FEvars.nas_filename,'w'); % make nastran file
% Nastran initial text:
nas_initialtext={'SOL 101';'CEND';'$';'STRESS = ALL';'STRAIN = ALL';...
'DISP = ALL';$ -----';...
'BEGIN BULK';'PARAM,POST,0';...
'$ ----- Property Data -----';...
['PBEAM,',num2str(FEvars.PID1),',',num2str(FEvars.MID1),',',num2str((element_radius)^2*pi),',',...
num2str((element_radius)^4*pi/64),',',num2str((element_radius)^4*pi/64),',,'];... % Element properties
'$ ----- Material Data -----';...
['MAT1,',num2str(FEvars.MID1),',',num2str(E),',',num2str(nu),',',num2str(rho),',,'];... % Bulk material properties
['MAT4,',num2str(FEvars.MID1),',',0,0,0,'];... % Thermal material properties
'$----- Begin auto fill data -----'];
for n=1:size(nas_initialtext,1) % Write initial nastran text to file
    fprintf(fid_nas, '%s\n',nas_initialtext{n});
end
% Create nastran grid points (nodes)
for n=1:size(nodes_unique,1) %Print nodes from structure - comma seperated.
    % Print NASTRAN Nodes
    fprintf(fid_nas, '%s \n',['GRID',num2str(n),',',num2str(nodes_unique(n,1)),...
        ',',num2str(nodes_unique(n,2)),',',num2str(nodes_unique(n,3))]);
end
end

```

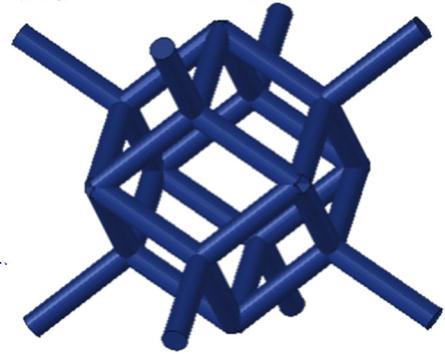


Abb. 4.14: Algorithmus für BDF Export und Darstellung der Einheitszelle in HyperMesh

Dieser Datensatz kann anschließend innerhalb des FE-Pre-Prozessors für eine nachträgliche FE Analyse verwendet werden.

4.4 Gitterstrukturen für hybride Werkstoffverbindungen

Neben den bekannten Methoden unterschiedliche Werkstoffe zu verbinden (clinchen, kleben, nieten, schweißen, usw.), wird am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben eine neue Methode zur Verbindung artfremder Werkstoffe entwickelt. Mit deren Hilfe können nicht nur metallurgisch inkompatible, sondern auch substantiell konträre Werkstoffe wie Metalle und Kunststoffe erfolgreich miteinander verbunden werden.

Das Wirkprinzip dieser Verbindung basiert auf einem reinen Formschluss. Hierbei werden Geometrien und Übergangsbereiche mit starkem Fragmentierungsgrad und Hinterschnitten, mit gradiertem oder konstanter Porosität über die additive Fertigungstechnologie hergestellt. Im Anschluss wird mittels konventionellen Fertigungsverfahren das Gegenstück hergestellt.

4.4.1 Charakterisierung der Verbindungszone

Die Übergangszone bildet bei dieser Hybridverbindung das Kernelement und bestimmt primär die Festigkeit und Steifigkeit der Verbindung. Es wird gezeigt, dass die Zellgröße sowie auch die Form der Übergangszone einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtfestigkeit liefern. Durch die Anpassung beider Komponenten können nahezu die Festigkeiten des schwächeren Werkstoffes der Hybridverbindung erreicht werden. Im vorliegenden Fall wird eine Metall/Kunststoff Verbindung untersucht. Die Geometrie der metallischen Komponente wurde mittels Autodesk Inventor konstruiert. Die Gitterstruktur für die Übergangszone basiert auf einer rhombisch dodekaedrischen Einheitszelle. Die unterschiedlichen "geraden" Übergangszonen wurden mit Zellgrößen von 2mm bis 8mm und einer relativen Dichte von 30% konstruiert. Daraus können die erforderlichen Strebenlängen und Durchmesser abgeleitet werden (Tab. 4.2). Die erste Versuchsreihe besitzt Strebendurchmesser von 0,385mm bis 1,54mm und Strebenlängen von 0,866mm bis 3,464mm. Die Übergangszone wurde normal zur Prüf-/Belastungsrichtung konstruiert. Dadurch wird ein scharfer Übergang zwischen Metall und Kunststoff realisiert. Die Geometrie der ersten Hybridverbindung ist in Abb. 4.15 dargestellt. Nach dieser grundsätzlichen Untersuchung wird der Einfluss einer Änderung der Übergangszonengeometrie untersucht.

Tab. 4.2: geometrische Versuchsdaten für die Basis-Testserie.

Nr.	Form [Länge x Größe ³]	Strebendurchmesser d[mm]	Strebenlänge l[mm]	rel. Dichte [%]
1	5x2 ³	0,385	0,866	30
2	5x4 ³	0,77	1,732	30
3	5x8 ³	1,54	3,464	30
4	10x2 ³	0,385	0,866	30
5	10x4 ³	0,77	1,732	30
6	10x8 ³	1,54	3,464	30
7	15x4 ³	0,77	1,732	30
8	15x8 ³	1,54	3,464	30

Länge ... Länge "a[mm]" der Übergangszone, Größe ... Kantenlänge "z[mm]" der Einheitszelle

Hierfür wird der gerade Übergang (||) zu einer „A“ bzw. „V“ Form umkonstruiert. Für die neue Übergangsgeometrie werden analog zur ersten Versuchsreihe, Gitterstrukturen mit einer relativen Dichte von 30% verwendet. Die spezifischen Abmessungen sind in Tab. 4.3 zusammengefasst.

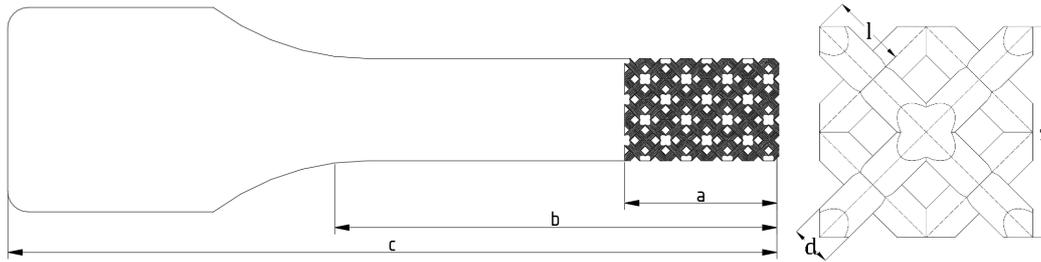


Abb. 4.15: Beispielgeometrie für die Hybridverbindung mit einer normal zur Belastungsrichtung orientierten Übergangszone. Probenquerschnitt beträgt $4 \times 10 \text{ mm}$ – a...Länge der Übergangszone [mm], b...halbe parallele Länge der Zugprobe [mm], c...halbe Zugprobenlänge [mm], z...Größe der Einheitszelle [mm], l...Strebenlänge [mm], d...Strebandurchmesser [mm]

Neben diesen Geometrieformen wird eine weitere Testserie ohne Gitterstrukturen konstruiert. Zweck dieser Versuche ist die Evaluierung von Adhäsionskräften zwischen dem Kunststoff und dem metallischen Werkstoff. Durch diese Versuche kann gezeigt werden, dass die resultierende Verbindungsfestigkeit allein durch den Gitterformschluss begründet ist \rightarrow keine Haftung von Kunststoff auf Metall da sich der Kunststoff durch den Spritzgussprozess nicht mit der Metallhälfte verbunden hat (Bauteile wurden getrennt aus der Anlage ausgeworfen).

Tab. 4.3: geometrische Versuchsdaten für die zweite Testserie.

Nr.	Form [Größe_Form]	Strebandurchmesser d [mm]	Strebenlänge l [mm]	rel. Dichte [%]
1	z4A	0,77	1,732	30
2	z8A	1,54	3,464	30
3	z8V	1,54	3,464	30

4.4.2 Herstellung der metallischen Probengeometrie

Für die Herstellung der metallischen Seite der Probengeometrie wird eine additive Fertigungsanlage vom Typ EOS M280 verwendet. Die Zugprobenhälften werden aus dem Werkstoff X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709) gefertigt. Die Fertigung wird bei einer Laserleistung von 285W und einer Scangeschwindigkeit von 960mm/s durchgeführt. Zusätzliche Parameter sind der Hatchabstand mit 0,11mm und der Fokussdurchmesser von $100 \mu\text{m}$. Alle additiv gefertigten Proben werden im Anschluss, beidseitig geschliffen um Komplikationen durch eine Fehlpassung und Unebenheiten der Metall-Inlays im nachfolgenden Spritzgussprozess zu vermeiden. Diese Schleifarbeiten werden auf einer

Jacobsen SJ825 (mit Al₂O₃ Schleifscheibe) am Lehrstuhl für Umformtechnik durchgeführt.

4.4.3 Herstellung der Hybridverbindung

Im Anschluss an die additive Fertigung der metallischen Zugprobenhälfte wird die Kunststoffkomponente mittels Spritzguss hergestellt. Diese wird durch den hohen Prozessdruck, der in weiterer Folge eine Infiltration der Gitterstruktur verursacht, realisiert. Diese Spritzgussversuche werden auf einer Arburg Allrounder 470A 1000-400 durchgeführt. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tab. 4.4 dargestellt.

Tab. 4.4: Prozessparameter für den Spritzguss der Hybridverbindung.

Werkzeug- temperatur	Düsen- temperatur	Nachdruck	Zykluszeiten			Σ
			füllen	halten	kühlen	
40°C	230°C	350bar	3s	15,2s	32s	50,2s

Aufgrund der guten Verarbeitbarkeit und der hohen Verfügbarkeit wird für die Kunststoffkomponente der Kunststoff Braskem PP C7069-100NA verwendet. Die resultierende Zugprobe mit einer Hybridverbindung erfüllt die geometrischen Anforderungen einer normgerechten Zugprobe (EN ISO 527-1:2012) und kann dadurch direkt mit einer Referenzprobe aus Kunststoff verglichen werden.



Abb. 4.16: Fertige Zugprobe mit Hybridverbindung zwischen Metall und Kunststoff

4.4.4 Ergebnisse der Hybridverbindung

Die mechanische Prüfung der Verbindungsfestigkeit wird mittels Zugversuch durchgeführt. Hierfür wird die Zugprüfmaschine ZWICK Z250 mit einem makroXtense Extensometeraufsatz verwendet. Für alle durchgeführten Versuche wird eine Vorkraft von 20N verwendet. Ausgewertet werden der Elastizitätsmodul, die Streckgrenze und die Zugfestigkeit. Die Auswertemethodik wird über die Federkonstanten des Metall-, Kunststoff- und Verbindungssegmentes durchgeführt (siehe Kapitel 3.6.1.2). Der Vergleich der Verbindungssteifigkeiten (Abb. 4.17) zeigt, dass die Werte abhängig von

der Verbindungszonenlänge sind. Für Einheitszellen mit einer Verbindungslänge von 5mm ist eine maximale Steifigkeit von ca. 3300MPa bei einer Zellgröße von 4mm Kantenlänge zu finden. Bei einer Verbindungszonenlänge von 10mm befindet sich das Steifigkeitsmaximum von ca. 4600MPa bei einer Zellkantenlänge von 8mm. Die höchste Steifigkeit von ca. 12600MPa wird bei einer Verbindungszonenlänge von 15mm und einer Zellkantenlänge von 4mm festgestellt. Die Referenzprobe erreicht hingegen eine Steifigkeit von ca. 1600MPa.

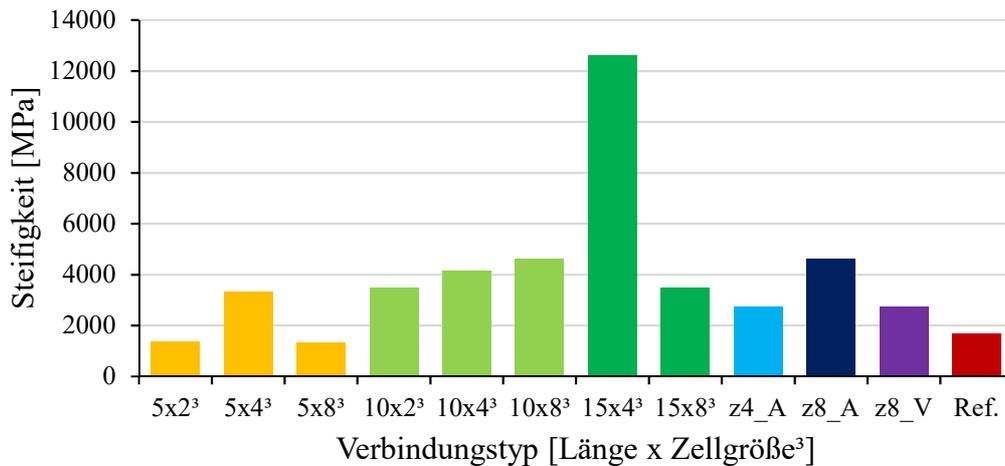


Abb. 4.17: Verbindungssteifigkeit unterschiedlicher Zelltypen im Vergleich zur Referenz-Kunststoff-Zugprobe

Die Auswertung der Zugfestigkeit (Abb. 4.18) zeigt hingegen deutliche Trends. Bei den kürzeren Übergangszonen (5xX und 10xX) steigt die Zugfestigkeit mit der Zunahme der Zellgröße von ca. 10MPa auf 14MPa (40%).

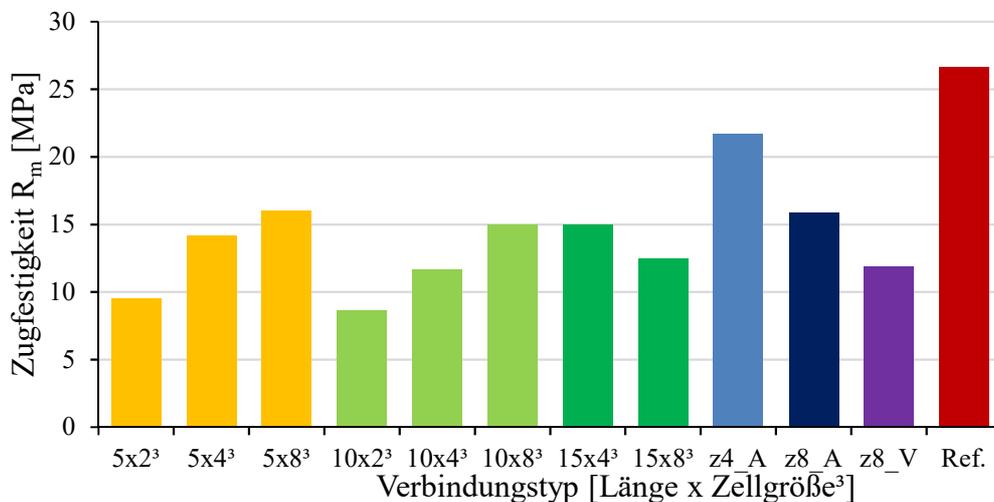


Abb. 4.18: Zugfestigkeit der unterschiedlichen Hybridverbindungen im Vergleich zur Referenz-Kunststoff-Zugprobe

Die Hybridverbindungen mit einer längeren Verbindungszone zeigen hingegen ein konträres Verhalten. Die Zugfestigkeit nimmt hierbei von ca. 15MPa auf 12,5MPa (17%) ab. Gesamt betrachtet ist jedoch auch bei den besten Kombinationen nur die halbe Zugfestigkeit des Kunststoffes (ca. 26MPa) erreichbar. Die Änderung der Verbindungszonengeometrie führt im Vergleich zur ersten Testserie zu einer deutlichen Verbesserung (Steigerung auf ca. 22MPa) der Verbindungsfestigkeit.

Ein weiterer Aspekt wird beim direkten Vergleich der “A” und “V” Form erkennbar. Der “A” Übergang führt zu deutlich höheren Festigkeiten als ein “V” Übergang. Abschließend wird das Bruchverhalten beider Übergangszonen analysiert (Abb. 4.19). Alle Übergangszonentypen (||, A und V) weisen eine Bruchlinie entlang der Gittergrenze auf und brechen auf der Kunststoffseite aufgrund des durch die Gitterstruktur reduzierten Restquerschnittes.

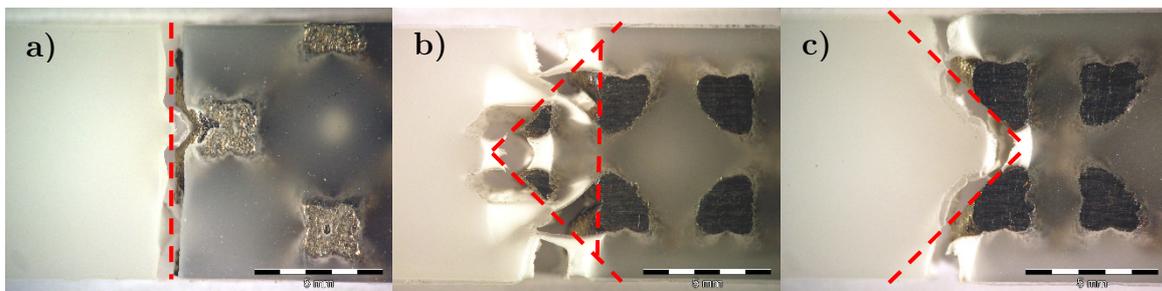


Abb. 4.19: Vergleich des Bruchverhaltens der unterschiedlichen Übergangszonen: a)10x8³, b)z8A and c)z8V.

Beim “A” Übergang (Abb. 4.19b) wird durch die Hinterschnitte der Gitterstruktur ein zusätzlicher Hafteffekt erzeugt, der die Gesamtfestigkeit deutlich erhöht. Abb. 4.19a) und c) zeigen, dass diese Verbindungstypen zum Sprödbbruch neigen. Im Gegensatz dazu zeigt der A-Übergang (Abb. 4.19b) ein duktileres Bruchverhalten. Abschließend können aus diesen Untersuchungen Kriterien für eine Hybridverbindung zwischen Kunststoff und Metall abgeleitet werden.

- Verlängerung der Bruchlinie durch gewinkelte Übergangszonen
- viskositäts- und festigkeitsabhängige Festlegung der Gittergröße (Kunststoff)
- niedrig viskose Kunststoffe → kleinere Gitter
- höher viskose Kunststoffe → größere Gitter
- keine scharfen Geometrien oder Ausprägungen in der Übergangszone
- möglichst große zusammenhängende Restquerschnitte für den Kunststoff → wenige dicke Stränge >> viele dünne Stränge

- möglichst komplexe Hinterschnitte unter Berücksichtigung der Stoffeigenschaften

Abschließend wird die Qualität der hergestellten Hybridverbindung über die benötigte Kraft (Maximalkraft aus Zugversuchen) quantitativ erfasst. Alle Gittergeometrien der ersten Versuchsreihe befinden sich am unteren Ende der Verbindungsfestigkeit. Die maximale Zugkraft beträgt 0,7kN bei einem 5×8^3 Gittertyp. Dieser Wert entspricht ca. 65% der maximalen Zugkraft der reinen Kunststoffprobe (1,07kN). Die Änderung der Übergangsgeometrie ($5 \times 8^3 \rightarrow z4_A$) führt schlussendlich zu einer Steigerung der Zugkraft der Hybridverbindung auf 0,9kN. Das entspricht 90% des Referenzwertes.

4.5 Wärmebehandlung von additiv gefertigten Bauteilen

Um den Einfluss einer nachfolgenden Wärmebehandlung (WBH) auf ein additiv hergestelltes Aluminiumbauteil zu bestimmen, werden an baugleichen Proben unterschiedliche Wärmebehandlungen durchgeführt und analysiert. Es ergibt sich eine Matrix (Abb. 4.20) mit unterschiedlichen Auslagerungstemperaturen und unterschiedlichen Auslagerungszeiten.

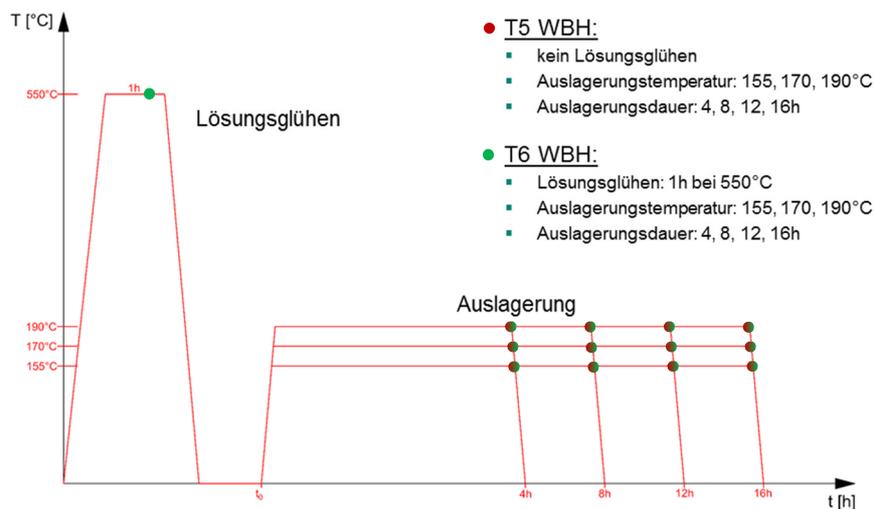


Abb. 4.20: Versuchsmatrix für Wärmebehandlungsstudie – T5 + T6

Weitere Versuchsparameter sind die Temperatur und die Dauer für das Lösungsglühen. Ziel des Lösungsglühens bei Aluminium-Knetlegierungen ist die Homogenisierung des Gefüges in Form des $\alpha - MK$. Aluminiumgusslegierungen orientieren sich in ihrer Zusammensetzung nahe am eutektischen Punkt. Für Gießprozesse bedeutet dies, dass

während der Erstarrung der Schmelze in der Form ein möglichst kleines Zweiphasengebiet durchschritten wird.

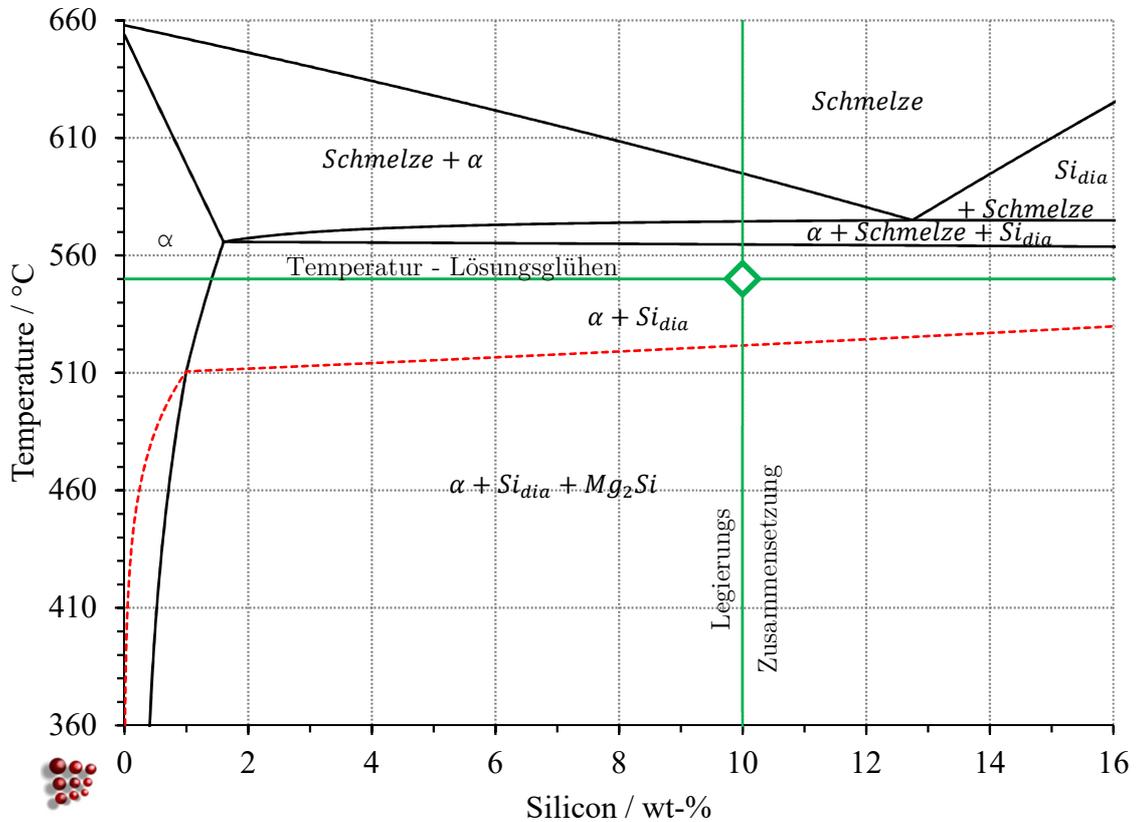


Abb. 4.21: Phasendiagramm der untersuchten Aluminiumlegierung AlSi10Mg (AM) mit 10wt% Si und 0,5wt% Mg (berechnet mit MatCalc V6) [114]

Daraus ergibt sich der Nachteil, speziell bei AlSi10Mg, dass ein Lösungsglühen nahe unterhalb des Zweiphasengebietes zu einer starken Vergrößerung der ausgeschiedenen Si-Partikel führt. Das zugehörige Phasendiagramm mit der Lösungsglühtemperatur ist in Abb. 4.21 dargestellt. Für die WBH Untersuchung werden Probenkörper aus AlSi10Mg mittels EOS M280 hergestellt. Im Anschluss werden die Proben bei unterschiedlichen Temperaturen und Haltedauern (Tab. 4.5) einer WBH unterzogen.

Tab. 4.5: Auflistung der WBH-Versuchsreihen

WBH	Temperatur [°C]	Auslagerungsdauer [h]	Lösungsglühen (T5 / T6)
T5 / T6	155	4,8,12,16	- / 1h 550°C
	170	4,8,12,16	- / 1h 550°C
	190	4,8,12,16	- / 1h 550°C

Das Lösungsglühen wird bei einer Temperatur von 550°C und einer Haltedauer von 1h durchgeführt. Diese resultierende Versuchsmatrix ist in Abb. 4.20 dargestellt. Aufgrund der Zusammensetzung der Legierung, diese entspricht einer eutektischen Gusslegierung, wird durch das Lösungsglühen ein starkes Wachstum von Si-Partikeln forciert. Die Siliziumpartikel liegen als inkohärente Plättchen umgeben vom Al-Mischkristall vor. Im Anschluss an die WBH werden die Proben metallographisch präpariert und mittels Flick-Ätzung ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dest.}} + 5\% \text{ HF}$) geätzt. Nach einer Auswertung des Gefüges im Lichtmikroskop werden die Gefügebestandteile mittels Rasterelektronenmikroskop (EDX) analysiert. Neben der Gefügeuntersuchung werden die mechanischen Kennwerte mittels Zugversuch (Zwick Z250 mit makroXtense Extensometer; DIN EN ISO 6892-1:2009-12) ermittelt.

4.5.1 Ergebnisse der Wärmebehandlungsversuche

Die Gefügeentwicklung für den klassischen L-PBF Prozess ist in Abb. 4.22 dargestellt. Deutlich sind hierbei die einzelnen, für den Prozess charakteristischen Laserschmelzbahnen in der Draufsicht (Abb. 4.22a) sowie in der Seitenansicht in Baurichtung (Abb. 4.22b) zu erkennen. Die Auswirkungen einer Wärmebehandlung und speziell einer T6 Wärmebehandlung auf die AlSi10Mg Legierung sind in Abb. 4.23 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass das Lösungsglühen der T6 Wärmebehandlung im Gegensatz zur T5 Wärmebehandlung eine weitreichende Veränderung des typischen L-PBF-Gefüges hervorruft.

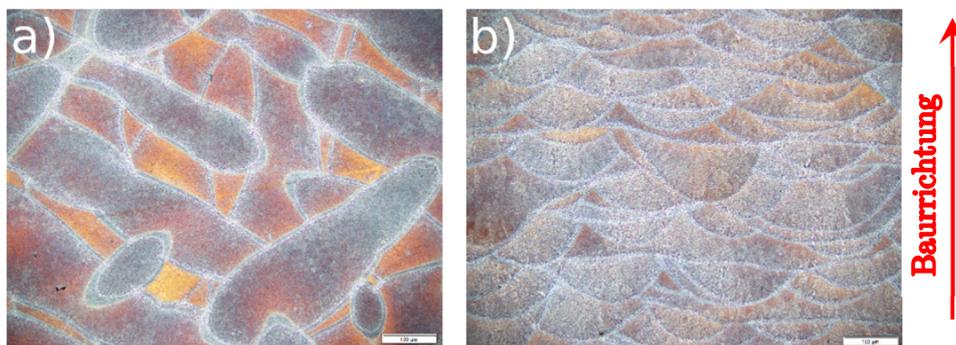


Abb. 4.22: Lichtbildaufnahme des L-PBF Gefüges von AlSi10Mg: a) Draufsicht und b) Seitenansicht

4.5.1.1 Gefügeausbildung in Abhängigkeit der WBH

Wie erwartet werden nach dem Lösungsglühen homogen verteilte Si-Partikel gefunden. Dies rührt von der langen Haltezeit im Zweiphasengebiet der Legierung ($\text{MK} + \text{Si}_{\text{Dia}}$).

Weiters wird durch die Ausscheidung von Silizium die erzielbare Festigkeit reduziert. Sowohl bei den Zugversuchen als auch bei den Härtemessungen wird daher eine geringere Festigkeit von T6 behandelten Proben festgestellt. Die T5 WBH hingegen zeigt deutlich die L-PBF-Laserschmelzbahnen. Diese L-PBF typische Gefügestruktur wurde bereits von Lam et al. [101] untersucht. Im Wesentlichen entwickelt sich ein zellulär-dendritisches Zellgefüge. Dieses Gefüge ist auf die L-PBF typischen Kühlraten von ca. 10^5 - 10^7 K/s zurückzuführen. Weiters wurde von Froes et al. [57] die Berechnung der Zellgröße für schnell erstarrte Schmelzen untersucht. Auf dieser Grundlage kann der mittlere Zelldurchmesser eines L-PBF-Gefüges mittels Gl. 4.3[14] bestimmt werden.

$$\lambda_z = y * \sqrt[3]{\frac{T_{S-L}}{\dot{T}}} \quad \text{Gl. 4.3}$$

Hierbei stellt $\lambda_z[\mu\text{m}]$ den Zelldurchmesser, $y[\mu\text{m}/\sqrt[3]{\text{s}}]$ einen werkstoffabhängigen Wachstumsparameter, \dot{T} [K/s] die Kühlrate und T_{S-L} [K] das zusammensetzungsabhängige Erstarrungsintervall dar.

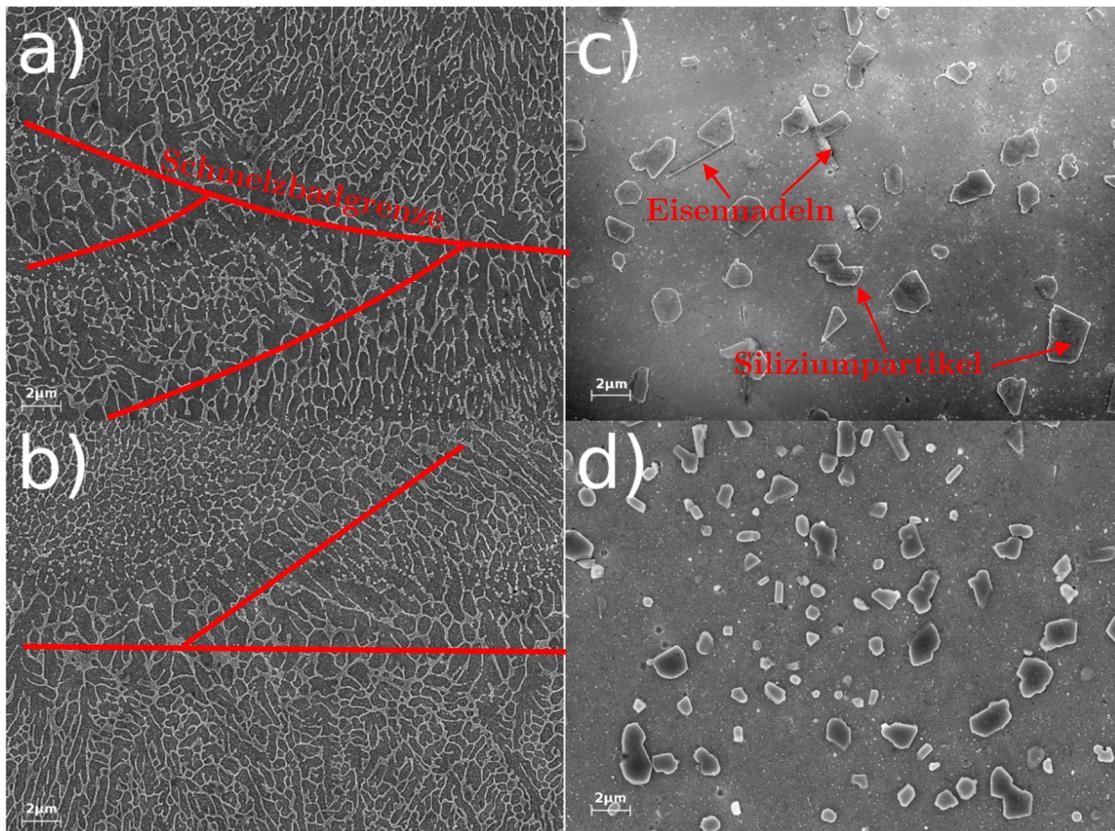


Abb. 4.23: REM Aufnahmen bei a) 4h @ 155°C b) 16h @ 190°C c) 4h @ 155°C + LG und d) 16h @ 190°C + LG

Für die verwendete AlSi10Mg Legierung wird ein mittlerer Zelldurchmesser von ca. 500nm (Abb. 4.23) bestimmt. Dieses Ergebnis wird auch durch die Untersuchungen von Thijs et al. [96] und Lam et al. [101] bestätigt. Deutlich zu erkennen sind in Abb. 4.23 a) und b) die zellulären Strukturen. Diese bestehen aus Al-Zellen umgeben von einem Netzwerk aus Si-Eutektikum. Zusätzlich ist deutlich die Schmelzbadgrenze zu erkennen (Bereich mit größeren Strukturen). [101]

In Abb. 4.23 c) und d) ist das Gefüge nach einer T6 WBH zu dargestellt. Das T6-Gefüge ist durch primär ausgeschiedene Si-Partikel eingebettet im Eutektikum charakterisiert. Neben den Si-Partikeln sind in Abb. 4.23 c) Fe-Nadeln erkennbar.

4.5.1.2 Einfluss auf die Streckgrenze und die Zugfestigkeit

Wie in Abb. 4.24 dargestellt führt eine Wärmebehandlung ohne Lösungsglühen zu einer Zugfestigkeit von ca. 425MPa bei allen Auslagerungszeiten. Ein leicht fallender Trend ist dennoch aufgrund der höheren Auslagerungstemperatur erkennbar.

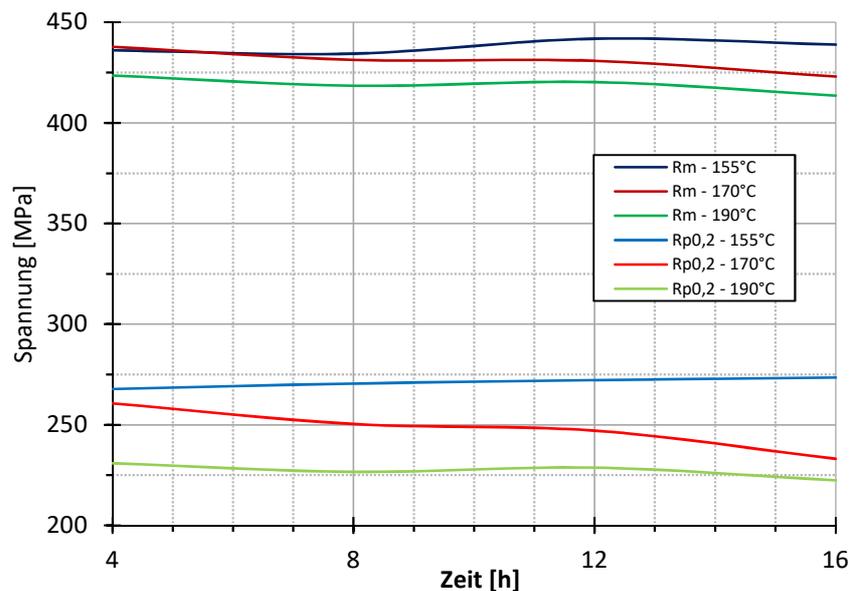


Abb. 4.24: Resultierende Zugfestigkeit R_m und Streckgrenze R_e nach einer Wärmebehandlung ohne Lösungsglühen (T5)

Die Streckgrenze zeigt einen ähnlich konstanten Verlauf. Die Festigkeiten liegen im Bereich von 225MPa bis 270MPa. Hierbei ist der Temperatureinfluss der höheren Auslagerungstemperatur deutlicher ausgeprägt.

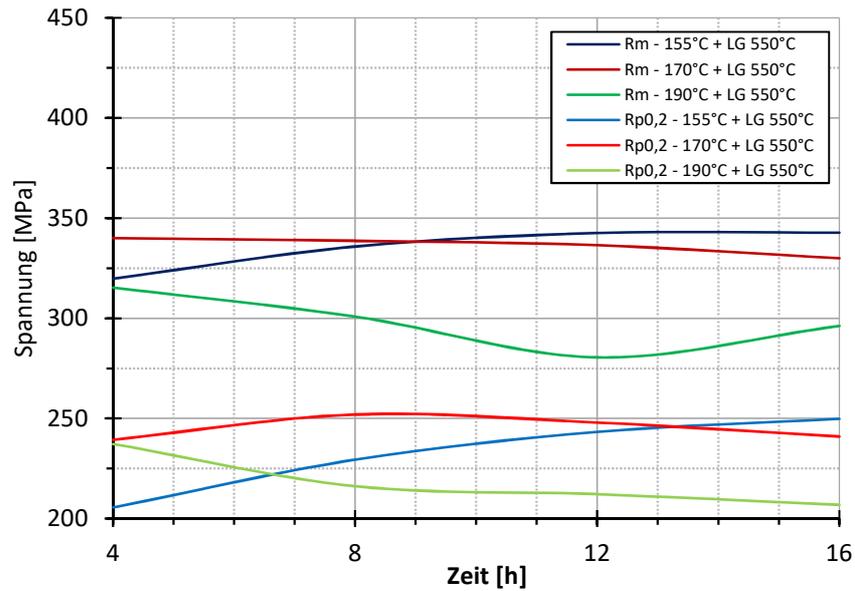


Abb. 4.25: Resultierende Zugfestigkeit R_m und Streckgrenze $R_{e0,2}$ nach einer Wärmebehandlung mit Lösungsglügen (T6)

Die Wärmebehandlung mit Lösungsglügen (T6) zeigt ein deutlich abweichendes Bild hinsichtlich Zugfestigkeit (Abb. 4.25). Im Vergleich zur T5 Wärmebehandlung wird eine um ca. 18% geringere Zugfestigkeit erreicht.

Tendenziell ist eine geringere Auslagerungstemperatur geeigneter um höhere Festigkeiten zu erreichen. Die maximale Zugfestigkeit von ca. 350 MPa liegt hierbei bei 155°C und einer Auslagerungszeit von 12-16h. Die Streckgrenze zeigt einen leichten Einfluss der Temperatur und der Auslagerungszeit. Die Unterschiede zwischen beiden Wärmebehandlungen sind auf das Lösungsglügen zurückzuführen.

Bei einer T6-Wärmebehandlung führt das Lösungsglügen für 1h bei 550°C bei der untersuchten Aluminiumlegierung (AlSi10Mg) zu einer Ausscheidung von Siliziumkristallen in der eutektischen Phase. Bei der T5-Wärmebehandlung hingegen bleibt das bekannte „L-PBF-Gefüge“ über die gesamte Versuchsmatrix erhalten.

4.6 Prozessparameter für AlSi10Mg

Wie bereits beschrieben ist der L-PBF-Prozess von einigen Parametern abhängig. Diese sind die Laserleistung $P[W]$, die Scangeschwindigkeit $v[\frac{mm}{s}]$, der Hatchabstand $h[\mu m]$ und die Schichtstärke $z[\mu m]$ der aufgetragenen Pulverschicht.

Tab. 4.6: L-PBF Parameter für AlSi10Mg

Literatur	[26]		[28]		[87]		[86]	[40]	[120]	[24]	[118]		[96]					
Leistung																		
P [W]	910	910	300	500	700	900	1000	200	200	250	100	400	175	200	200	200	200	200
Scan v [mm/s]	1000-4000	150-350	500	1200	1600	2100	2200	1400	1400	500	500	7000	1025	1400	1400	1400	1400	1400
Schicht z [mm]	0,05	0,05		0,05				0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03				0,05	
Hatch h [mm]	0,2	0,7		0,15				0,105	0,105	0,15	0,05	0,065	0,065	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105
Focus df [mm]	0,3	1		0,2				0,15	0,15	0,2		0,05	0,05	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Heizung T [°C]										30/300	200							
Atmosphäre	Ar	Ar						Ar	Ar	Ar			Ar				Ar	
Volumenenergie [J/mm³]	36	104	80	56	58	57	61	27	27	67	100	22	88	27	27	27	27	27
Baurate [mm³/s]	25,0	8,8	3,8	9,0	12,0	15,8	16,5	7,4	7,4	3,8	1,0	18,2	2,0	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
relative Dichte [%]		99	99,5	99,8	99,8	99,8	99,8	98,5 (99,8)			97,5		98,3	99	98,9	99,4	98,2	98,7
Belichtung		chess						90°			90°		chess + 90°	0°	0°	90°	chess + 90°	chess + 90°
Anlage	Trumpf Truform LF250	Trumpf Truform LF250						Concept Laser M1	Concept Laser M1	Trumpf Truform LF150	Realizer SLM150	Concept Laser M2	Concept Laser M2				Concept Laser M1	

In Tab. 4.6 sind einige Parametersätze aus der Literatur zusammengefasst dargestellt. Für jeden Werkstoff muss ein eigener Parametersatz, angepasst an die zu druckende Geometrie, experimentell ermittelt werden. Damit die Parametersätze untereinander vergleichbar werden, kann die Baurate B_R nach Gl. 4.4 [28] und die eingebrachte Volumsenergie E^v nach Gl. 4.5 [4] berechnet werden.

$$B_R = v * z * h \tag{Gl. 4.4}$$

$$E^v = \frac{P}{B_R} \tag{Gl. 4.5}$$

Buchbinder et al. [28] stellt für Aluminium eine Mindestlaserleistung von $300W$ bei einer Scangeschwindigkeit von $500 \frac{mm}{s}$ für die Fertigung von nahezu 100% dichten Bauteilen fest. Zusätzlich sind Variationen in der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit übersichtlich dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass eine willkürliche Änderung bei einem

der beiden Parameter, ohne den anderen Parameter anzupassen, direkte Auswirkungen auf die resultierende Dichte des Bauteils hat. [28]

4.7 Parameterstudie: Hatchabstand

Hierbei werden zylindrische Probenkörper mit unterschiedlichen Spurbreiten (Hatch) hergestellt. Abb. 4.26 zeigt den Einfluss des Hatchabstandes auf die relative Dichte bzw. Porosität des hergestellten Bauteiles. Die Laserleistung sowie die Scangeschwindigkeit wurden ausgehend vom Std. Parametersatz auf $P=360\text{W}$ und 1300mm/s für alle Proben festgelegt. Deutlich zu erkennen ist ein Plateau für eine maximale relative Dichte zwischen $60\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$ Hatchabstand.

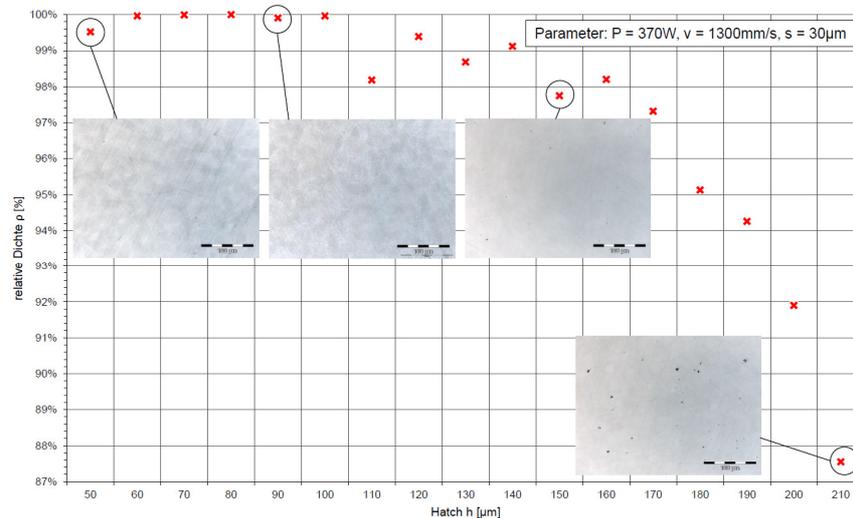


Abb. 4.26: Abhängigkeit der relativen Dichte vom Hatchabstand $h[\mu\text{m}]$ für den Werkstoff AlSi10Mg (Laserleistung $P=370\text{W}$, Scangeschwindigkeit $v=1450\text{mm/s}$)

In diesem Bereich liegt der resultierende Porositätsanteil deutlich unter 1% . Unterhalb und oberhalb dieses Bereiches sinkt die relative Dichte ab, was sich in den Schlibfbildern in Form von größeren Poren oder Porennestern zeigt. Der Standardparameter ($h=190\mu\text{m}$) erreicht bei dieser Untersuchung eine relative Dichte von ca. 94% .

4.8 Parameterstudie: Leistung und Scangeschwindigkeit

Parallel zum Einfluss des Hatchabstandes wird der Einfluss der Scangeschwindigkeit und der Leistung auf die relative Dichte untersucht. Hierfür wird eine Parametermatrix, dargestellt in Abb. 4.27, abgearbeitet und anschließend metallographisch untersucht. Die

metallographische Untersuchung beinhaltet die Präparation der Proben durch Schleifen und Polieren sowie das Ätzen der Schriffe. Geätzt wurden die Aluminiumproben mit einer Flick-Ätzlösung ($\text{H}_2\text{O}_{\text{dest.}} + 5\% \text{ HF}$).

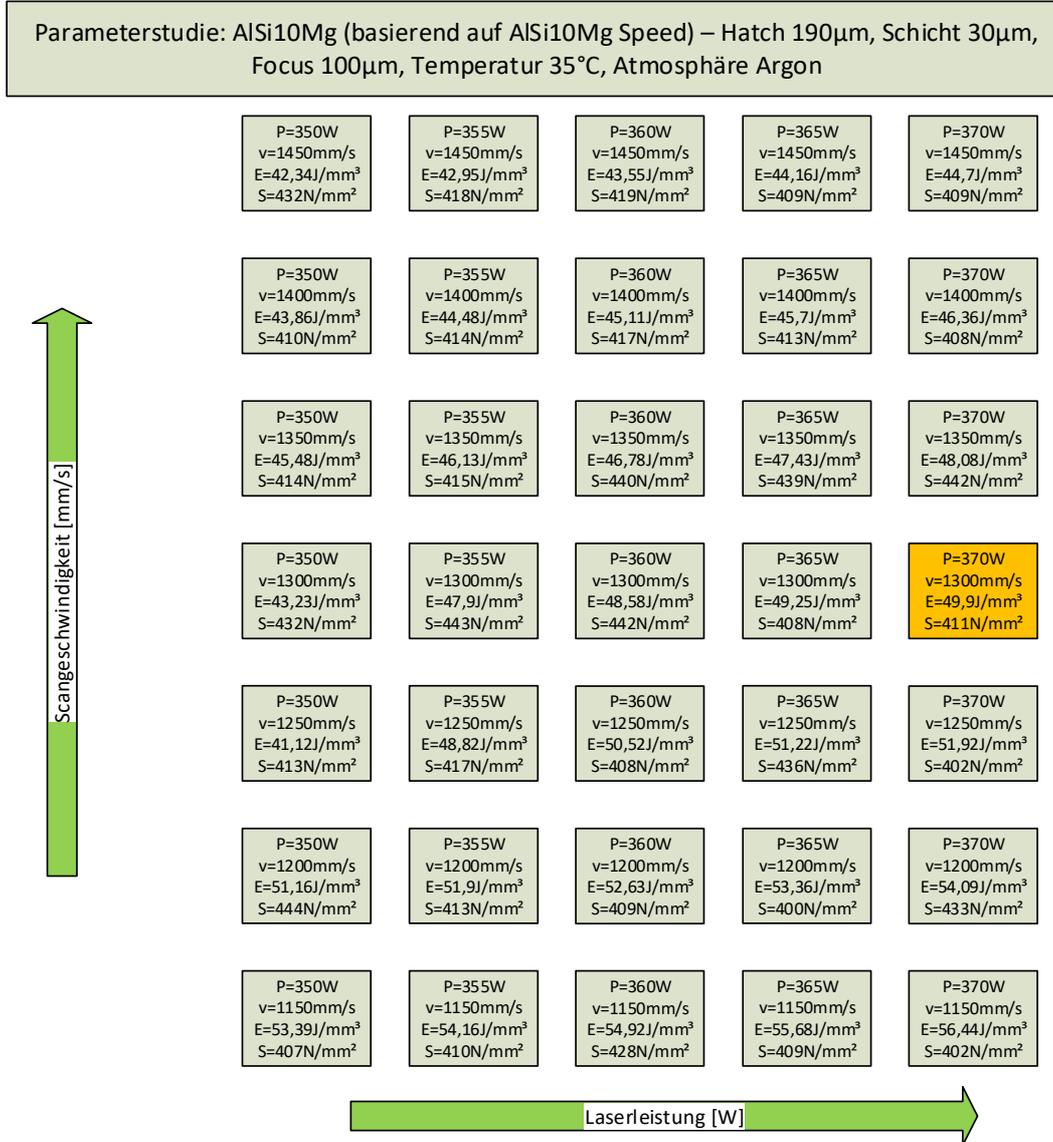


Abb. 4.27: Parametermatrix für die Parametereinflussstudie (std. Parametersatz gelb markiert)

Die Dichtebestimmung erfolgte mit der Hilfe der angefertigten Schriffbilder (Abb. 4.28) nach VDI3405. Hierfür werden über einen hell/dunkel Filter vorhandene Poren erkannt und ein Flächenanteil ausgegeben. Über diesen Porenflächenanteil wird dann die relative Dichte berechnet.

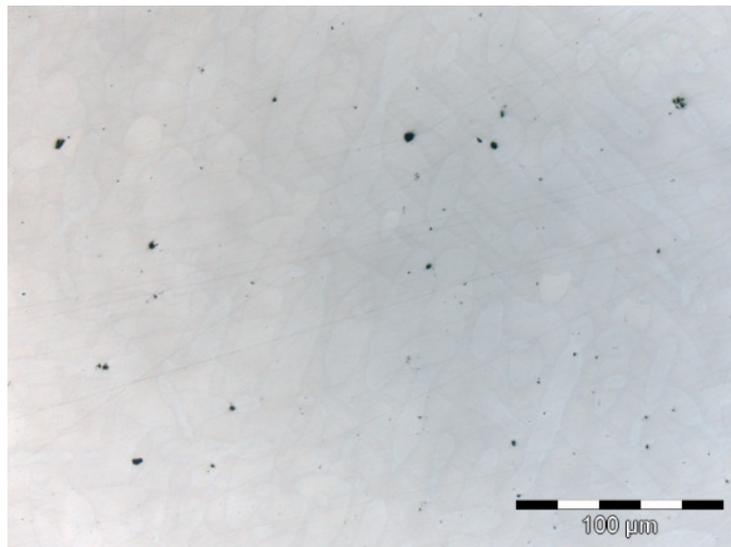


Abb. 4.28: Schliffbild für die Porositätsbestimmung mit 88% relative Dichte

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist, dass die Form der einzelnen Poren sichtbar ist. Zusätzlich sind auch Porenanhäufungen, sog. Porennester, sichtbar. Die alternative Bestimmung der relativen Dichte nach Archimedes liefert hingegen die globale Porosität des Bauteils.

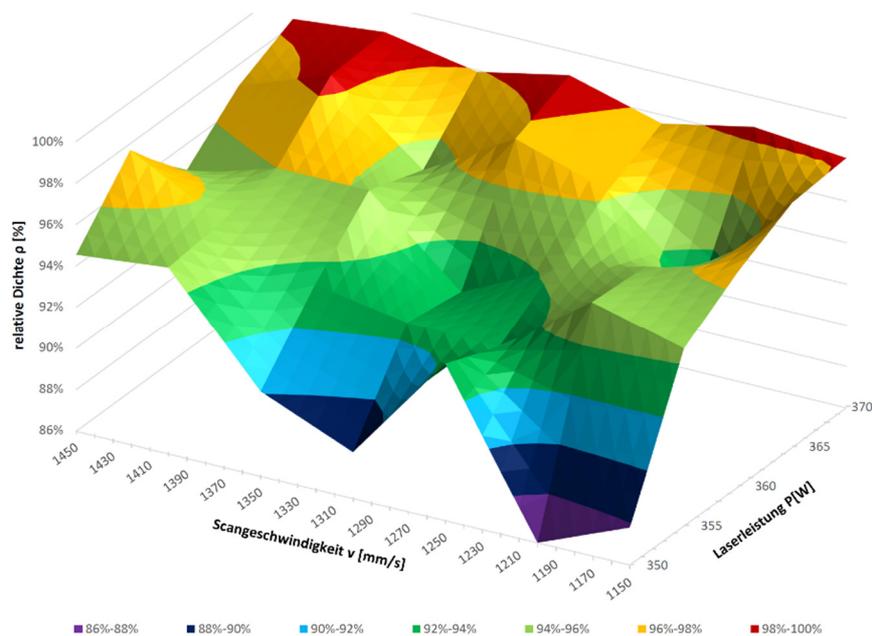


Abb. 4.29: Auswertung der relativen Dichte in Abhängigkeit von Laserleistung und Scangeschwindigkeit

4.9 Konstruktionsrichtlinien für Gitterstrukturen

Anlagenhersteller bieten ein umfangreiches Portfolio von grundlegenden Konstruktionsrichtlinien für additive Fertigungsprozesse. [45] Im Zuge der Untersuchung

von Gitterstrukturen und deren Eignung für die additive Fertigung werden maßgeschneiderte Konstruktionsrichtlinien für Gitterstrukturen erarbeitet. Basis für die Entwicklung der Konstruktionsrichtlinien sind spezielle Probekörper an denen unterschiedliche Merkmale wie Oberflächenrauheit, Oberflächenintegrität, maximale Neigung oder minimale Wand- und Strebendurchmesser untersucht werden.

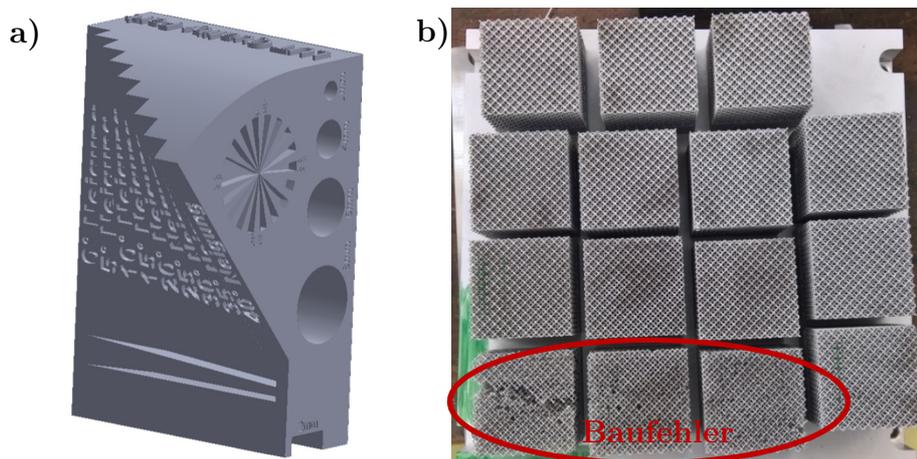


Abb. 4.30: Probekörper für die Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für Gitterstrukturen – a) Neigung, Oberfläche und Überhang b) minimale Wandstärke und Durchmesser.

Der Probekörper Abb. 4.30a) wird für die Untersuchung des maximalen Neigungs- oder Strukturwinkels, die Oberflächenrauheit und den Treppeneffekt verwendet. Die Probekörper in Abb. 4.30b) dienen der Evaluierung von strukturellen Baufehlern und der Ermittlung des minimalen Strebendurchmessers.

4.9.1 Baufehler

Während des additiven schichtweisen Fertigungsprozesses treten Baufehler vorwiegend wegen einer ungünstigen Geometrie und eines unzureichenden Energieeintrages auf. Ungünstige Geometrien sind gegen die Beschichtungsrichtung wachsende Strukturen sowie zu große horizontale Überhänge. Strukturen die gegen die Beschichtungsrichtung wachsen verursachen, durch den thermischen Verzug der dünnen Schichten, ein Verhaken des Beschichters das weiter zum Abbruch des Baujobs führt. Bei einem unzureichenden Energieeintrag in das Metallpulver, werden die Pulverpartikel unvollständig aufgeschmolzen was einerseits zu einer hohen Porosität und andererseits zur unvollständigen Verbindung der einzelnen Schichten führt. Bei einer Kombination beider Problemfälle sind enorme strukturelle Schäden an Gitterstrukturen (Abb. 4.31) die Folge.

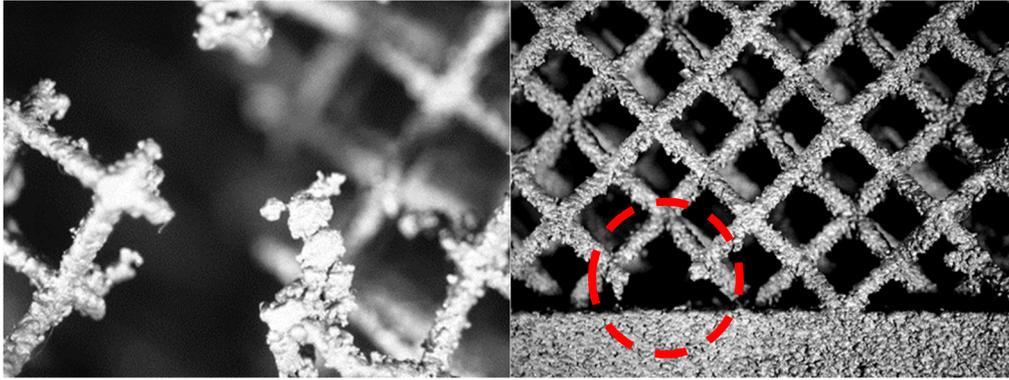


Abb. 4.31: Strukturelle Aufbaufehler einer Gitterstruktur. Bei der Unterschreitung der Fertigungs- bzw. Auflösungsgrenzen des Fertigungsprozesses vermehrtes Auftreten von Gitterfehlern.

4.9.2 Strukturwinkel

Der Strukturwinkel ist ein signifikanter und designbestimmender Parameter. Sind durch die Orientierung des Bauteils im Bauraum keine Positionen ohne Überhänge und schräge Ausprägungen möglich, müssen diese Areale zusätzlich mittels Support gestützt werden. Der wesentliche Nachteil von Supportstrukturen ist deren nachträgliche Entfernbarkeit aus dem Bauteil oder der Gitterstruktur. Bei Bauteilen lassen sich i.d.R. Supportstrukturen konventionell entfernen, wohingegen innerhalb von feinen Gitterstrukturen die Entfernbarkeit aufgrund der schlechten Zugänglichkeit verhindert wird.

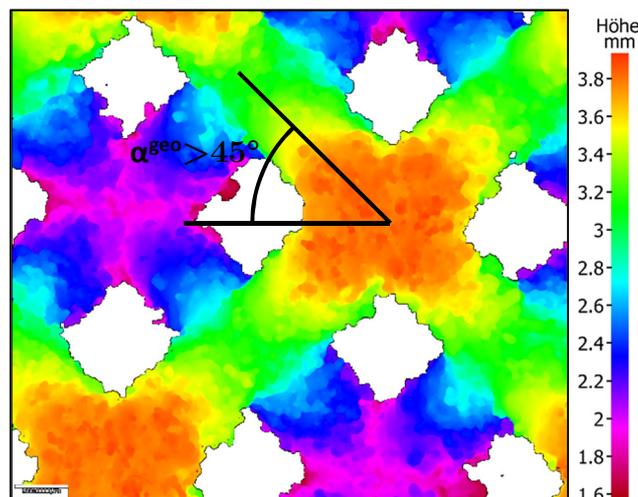


Abb. 4.32: Topographische Aufnahme einer Gitterstruktur für die Bestimmung des Strukturwinkels und Validierung der Bauergebnisse.

Anhand der Probengeometrie Abb. 4.30a) und b) wird die resultierende Oberflächenqualität sowie die generelle Herstellbarkeit bei unterschiedlichen Neigungen

(Abb. 4.32) untersucht. Grundsätzlich wird ein Strukturwinkel von $>55^\circ$ vorgeschlagen. Im Zuge dieser Untersuchung wird die Strukturwinkelrestriktion auf $>45^\circ$ gesenkt. Dies bedeutet weiter, dass Gitterstrukturen deren Streben einen Winkel von $>45^\circ$ zur Bauebene besitzen, additiv hergestellt werden können.

4.9.3 Minimaler Strebendurchmesser und Wandstärke

Der minimale Strebendurchmesser bei Gitterstrukturen wird über den Probekörper Abb. 4.30b) bestimmt. Hierbei werden Gitterwürfel mit unterschiedlicher relativer Dichte und konstanter Strebenlänge mittels additiver Fertigung hergestellt. Durch die Vorgabe der relativen Dichte und der konstanten Strebenlänge ergeben sich unterschiedliche Strebendurchmesser. Die Strebendurchmesser reichen von 0,39mm bis 1,04mm. Abb. 4.30b zeigt deutlich die Baufehler bei geringeren Strebendurchmessern.

Beim schichtweisen Aufbau der Geometrie werden die jeweiligen Querschnittsflächen der aktuellen Schicht durch lineare Laserbahnen belichtet und dadurch aufgeschmolzen. Das bedeutet, dass der minimal herstellbare Querschnitt bei der additiven Fertigung durch dieses Prozessprinzip beeinflusst wird. Schmale Querschnitte werden dadurch nur unzureichend vom Laser belichtet und dies führt schlussendlich zu Aufbaufehlern in Gitterstrukturen. Der minimale Strebendurchmesser kann daher von dem Fokusbereich des verbauten Lasers abgeleitet werden. Für die L-PBF Anlage EOS M280 mit einem 400W Nd:YAG Laser und einem Fokusbereich von $100\mu\text{m}$ ergibt das einen minimalen Strebendurchmesser von 0,4-0,5mm. Diese Grenze lässt sich durch Laser mit einem geringeren Fokusbereich (z.B. $50\mu\text{m} \rightarrow 0,2-0,25\text{mm}$) verschieben.

4.9.4 Prozessbedingte Oberfläche

Die resultierende Oberflächenrauheit für horizontale, vertikale und geneigte Oberflächen ist wesentlich von dem Füllmuster und dem Fokusbereich des Lasers abhängig. Bei geringen Strebendurchmessern erfolgt ein Aufbau der Gitterstruktur durch kurze Belichtungsstrecken bzw. im Extremfall durch Belichtungspunkte (Abb. 4.31 und Abb. 4.32). Dadurch wird die Oberfläche sehr uneben und ergibt schlussendlich eine hohe Rauheit (Tab. 4.7). Der Einfluss der Strebendurchmesser wird über die unterschiedlichen relativen Dichten (p20 bis p35) dargestellt. Hierbei werden Einheitszellen mit gleichen Außenabmessungen ($5 \times 5 \times 5 \text{mm}$) für alle Gitterstrukturen verwendet. Dadurch kann die relative Dichte nur durch die Änderung der Strebendurchmesser erfolgen wodurch die

Ergebnisse auch direkt auf diese zurückzuführen sind. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren wie Drehen (0,8-12,5µm), Fräsen (1,6-12,5µm) oder Sandguss (12,5-50µm) ist die „as-build“ Oberfläche additiv gefertigter Bauteile (17-35µm) rauher als spanend hergestellte Oberflächen und vergleichbar mit Gussoberflächen.

Tab. 4.7: Oberflächenrauheit bei additiv gefertigten Gitterstrukturen

Typ	Mittenrauheit $R_{a,L-PBF}$ [µm]	
	Upskin	Downskin
Ref.	6-10	17-30
20p	35,89	35,77
25p	23,40	31,27
30p	29,75	34,14
35p	20,67	26,69

4.9.5 Treppeneffekt

Der Treppeneffekt ist für gekrümmte Oberflächen bekannt und fordert ein Aufmaß zur Nachbehandlung. Bei feinen Gitterstrukturen äußert sich der Treppeneffekt in einer deutlichen Abstufung in den Streben (Abb. 4.31 und Abb. 4.32). Ist die prozessbedingte Schichtstärke zu groß gewählt, treten strukturelle Schäden aufgrund unzureichender Verbindung zwischen den Schichten auf. Daher wird für Gitterstrukturen eine maximale Schichtstärke von 40µm verwendet.

4.9.6 Zusammenfassung neuer Konstruktionsrichtlinien

Aus diesen Untersuchungen kann ein neuer Richtlinienkatalog für die Herstellung additiv gefertigter Gitterstrukturen abgeleitet werden (Tab. 4.8).

Tab. 4.8: Designrichtlinien für die additive Fertigung

Nr.	Richtlinie	Bemerkung
1	Strukturwinkel für feine Gitter	$>45^\circ$
2	Strebendurchmesser feiner Gitterelemente	$4-5 \times d_{\text{Focus}}$
3	Oberfläche	prozessbedingte Rauheit: $R_m \sim 17-35\mu\text{m}$
4	Orientierung und Platzierung	Geometrie an geplante Orientierung und Platzierung auf dem Substrat anpassen (s. Strukturwinkel)
5	Supportstrukturen	Bauteil für geringen Supportanteil auslegen (s. Strukturwinkel)
6	Sicht- und Funktionsflächen	prozessbedingten Treppeneffekt berücksichtigen durch Aufmaß (Nacharbeit) – min. $a_T = \frac{z}{\sqrt{2}}$
7	Wandstärke	minimale Wandstärke: $d_f + s_{\text{HAZ}} = t_{\text{min}}$ 1.2709: 0,6-0,8mm AlSi10Mg: 0,5-0,6mm

4.10 Kennzahlen und Formfaktoren für L-PBF

Neben den bereits beschriebenen klassischen Kennzahlen für den allgemeinen Leichtbau, werden im Rahmen dieser Arbeit fertigungstechnologiebezogene Kennzahlen entwickelt. Formfaktoren werden üblicherweise für einen raschen Vergleich von zwei oder mehreren Designvarianten verwendet. Hierbei können unterschiedliche Parameter miteinander in Verbindung gebracht werden um aussagekräftige und vor allem vergleichbare Kennwerte zu erhalten. Tab. 4.9 zeigt die entwickelten Kennwerte für optimierte Bauteile. Zusätzlich werden die wesentlichen Prozessparameter sowie Prozesscharakteristika in die Kennzahlen integriert, um prozessspezifische Aussagen treffen zu können.

Tab. 4.9: Kennzahlen für optimierte AM-Bauteile.

Nr.	Schwerpunkt	Kennzahl	Einheit
1	Funktionsintegration F_i	$\frac{k_{alt}}{k_{neu}}$	-
2	spannungsbezogene Werkstoffausnützung W_i	$\left(\frac{1}{\alpha_{sk} * ((\beta * R_{p0,2/m}) - \sigma_{max})^2 + 1} \right)^2$	MPa ⁻⁴
3	Orientierung des Bauteiles im Bauraum O_i	$\frac{\sum_{i=0}^{n-1} A_i}{10^6 * nz^2}$	-
4	Bauzeit t_i	$\frac{t_r}{t_t}$	-
5	Materialeffizienz der optimierten Struktur M_i	$\frac{\sqrt{E} * V_{BOX}}{G_{Structure}}$	$\frac{\sqrt{MPa} * cm^3}{g}$

k_{alt} ... Anzahl der Bauteile im Basisdesign für die Funktionserfüllung, k_{neu} ... Anzahl der Bauteile nach Funktionsintegration, α_{sk} ... Schwankungsbreite (std. 10⁻⁴), β ... Spannungstoleranz (z.B. 0,9 für 90% vom Materialkennwert), A_i ... Querschnittsfläche pro Schicht in mm², n ... Anzahl Schichten, z ... Schichtstärke in mm, t_r ... Referenzbauzeit, t_t ... Bauteilbauzeit, V ... Bauteilvolumen (Box) in cm³, G ... Bauteilgewicht in kg

In einem bauteil-, entwicklungs- und fertigungstechnologiebezogenen Kennwert Ω_{ToFe} (Gl. 4.6) werden alle Parameter zusammengefasst.

$$\Omega_{ToFe} = \frac{\sqrt{E} * V}{G} * \frac{k_{alt}}{k_{neu}} * \left(\frac{1}{\alpha_{sk} * ((\beta * R_{p0,2/m}) - \sigma_{max})^2 + 1} \right)^2 * \frac{\sum_{i=0}^{n-1} A_i}{nz^2} * \frac{t_r}{t_t} \quad \text{Gl. 4.6}$$

4.10.1 Funktionsintegration F_i

Für den Kennwert der Funktionsintegration wird eine Relation zwischen der Basisbaugruppe und dem optimierten Designvorschlag hergestellt. Hierbei führt eine stärkere Reduktion der Gesamtanzahl an notwendigen Bauteilen zu einer Erhöhung der

Kennzahl. Demnach wird eine umfassende Integration durch eine höhere Kennzahl ausgedrückt.

$$F_i = \frac{k_{alt}}{k_{neu}} \quad \text{Gl. 4.7}$$

4.10.2 Werkstoffausnutzung W_i

Die Werkstoffausnutzung berücksichtigt die werkstoffspezifischen mechanischen Eigenschaften. Im Speziellen sind dies die Streckgrenze $R_{p0,2}$ oder die Zugfestigkeit R_m des Basiswerkstoffes. Diese werden in Verbindung mit der maximal auftretenden kritischen Spannung gebracht um die Ausnutzung der Materialfestigkeit zahlenmäßig zu erfassen (Gl. 4.8). Implementiert sind zusätzlich der Parameter für die Skalierung der Schwankungsbreite (α_{SK}) sowie die Spannungstoleranz (β) zur Bestimmung der maximal zulässigen Spannung.

$$W_i = \left(\frac{1}{\alpha_{SK} * ((\beta * R_{p0,2}/m) - \sigma_{max})^2 + 1} \right)^2 \quad \text{Gl. 4.8}$$

Die maximale Spannung kann entweder im Designstadium durch Simulationen oder durch praktische destruktive Versuche am Prototyp mittels Dehnmessstreifen (DMS) bestimmt werden. Für die Evaluierung der Materialausnutzung (Abb. 4.33) wird mit den Werten $\alpha_{SK,0} = 10^{-4}$ und $\beta = 0,9 - 0,95$ eine optimale Auslegung des Designs forciert.

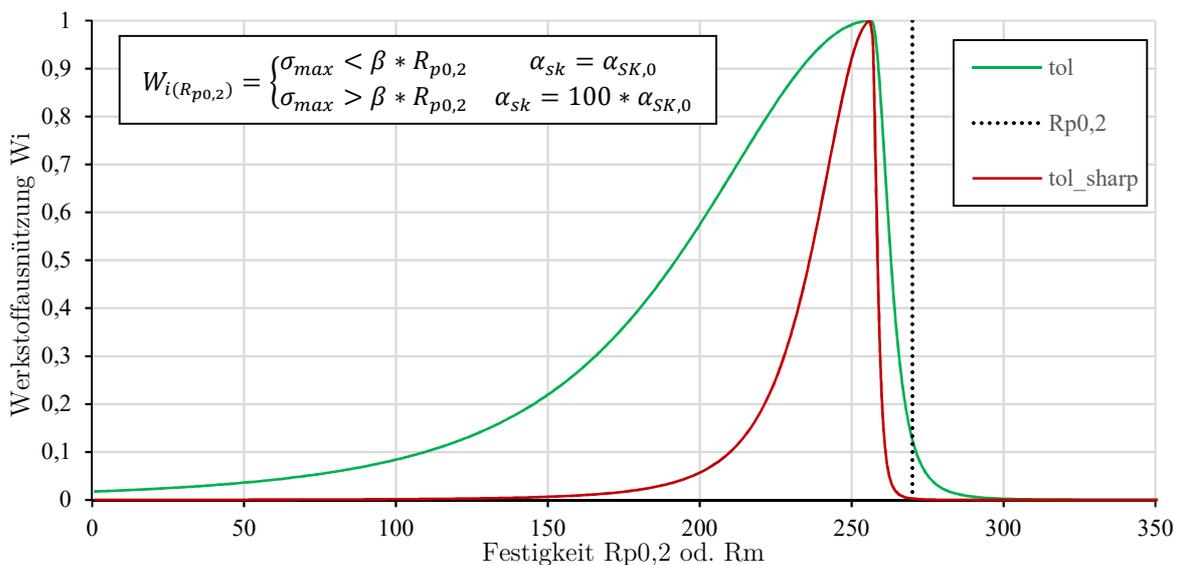


Abb. 4.33: Kennzahl für die Werkstoffausnutzung im Design. (tol: $\alpha_0=10^{-4}$, $\beta=0,95$, tol_sharp: $\alpha_0=10^{-3}$, $\beta=0,95$)

Bezogen auf einen tolerierten kritischen Festigkeitswert nimmt die Werkstoffausnutzung bei Über- und Unterschreiten des Zielwertes ab. Diese Abnahme der Werkstoffausnutzung resultiert in einer schlechteren Bewertung des Designvorschlages. Größere Werte für α erzeugen einen schärferen Abfall vor und nach der zulässigen Festigkeit und sind somit für kritische Bauteile sowie für eine exaktere Auslegung hilfreich (Abb. 4.33).

4.10.3 Bauteilorientierung O_i

Für den additiven Fertigungsprozess, spielt neben der globalen Bauteilgröße auch die Flächenverteilung über die einzelnen Schichten eine wesentliche Rolle. Zu beachten ist, dass durch ungleichmäßige Flächenverteilungen stark abweichende Bauzeiten für das Bauteil mit unterschiedlichen STL-Editoren berechnet werden. So resultieren ungünstig orientierte Bauteile mit einem großen Aspektverhältnis (Bauteilhöhe / Bauteilbreite) in einer deutlich erhöhten Bauzeit. Um die Bauteilorientierung zahlenmäßig zu erfassen benötigt man zusätzliche Informationen, die i.d.R mit den AM Pre-Processing-Softwarepaketen (Autodesk Netfabb, Materialise Magics u.a.) generiert werden. Hierbei wird der Quotient der Summe der nominellen Fläche pro Schicht und der Schichtinformationen (Schichtstärke und Anzahl der Schichten) gebildet. Dieser Quotient spiegelt das Aspektverhältnis, angepasst auf den AM-Prozess, wieder. Eine große Orientierungskennzahl ist hierbei wünschenswert, was in einer eben orientierten Ausrichtung resultiert. Eine geringe Kennzahl weist auf eine dünne und gleichzeitig hohe Orientierung des Bauteiles im Bauraum hin, was eine deutlich ungünstigere Position darstellt. Einerseits lassen sich hohe und dünne Strukturen ohne eine Stützstruktur nicht fehlerfrei herstellen und andererseits ist die Fertigungszeit eines hohen Bauteils deutlich größer als die bei einem identischen flach orientierten Bauteil.

$$O_i = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} A_i}{10^6 * nz^2} \quad \text{Gl. 4.9}$$

4.10.4 Fertigungszeit t_i

Die Netto-Bauzeit t_n für den Bauzeit-Kennwert t_i kann über die L-PBF Anlagensoftware oder direkt über die Vorbereitungssoftware (Magics, Netfabb, ...) bestimmt werden. Mit der Vorbereitungssoftware werden die benötigten Schichtdaten (Belichtungslänge des

Lasers pro Schicht) berechnet. Für die Berechnung der Netto-Bauzeit t_n wird der Zusammenhang nach Gl. 4.10 verwendet

$$t_n = \frac{l_{Layer}}{v} \quad \text{Gl. 4.10}$$

Hierbei stellt l_{Layer} [mm] die gesamte Belichtungslänge pro Schicht und v [$\frac{mm}{s}$] die Scangeschwindigkeit des Lasers dar. Diese Netto-Bauzeit beinhaltet keine Doppelbelichtungen, keine Skin/Core Trennung, kein Home-In (periodische Punktbelichtung während des Bauprozesses zur Messung der aktuellen Laserleistung) und keine Beschichtungszeiten.

$$t_i = \frac{t_n}{t_{n,ref}} \quad \text{Gl. 4.11}$$

Die Fertigungszeitkennzahl t_i wird schlussendlich aus dem Verhältnis der Bauzeit des optimierten Designs t_n zur Bauzeit des Referenzdesigns $t_{n,ref}$ berechnet.

4.10.5 Optimierungsgrad M_i

Der Optimierungsgrad M_i setzt sich aus der globalen relativen Dichte des Designvorschlages ($V_{Box}/G_{Structure}$) und dem Elastizitätsmodul zusammen. Die globale relative Dichte wird mit dem gesamten eingeschlossenen Volumen (V_{Box}) und dem Gesamtgewicht $G_{Structure}$ berechnet. Der Quotient aus der globalen relativen Dichte und dem Elastizitätsmodul ergibt eine globale Materialeffizienz mit dem Bezug auf die Optimierung der Geometrie oder Form. Je größer der Optimierungsgrad desto filigraner ist die Geometrie und desto geringer ist das im Bauteilinneren „verbaute“ Material.

$$M_i = \frac{\sqrt{E} * V_{BOX}}{G_{Structure}} \quad \text{Gl. 4.12}$$

Nachträglich wird ein Bauteil mit den vorgestellten Kennzahlen nach unterschiedlichsten Optimierungen evaluiert und bewertet. Die Geometrie wird mit unterschiedlichen Zielvolumina unter Einhaltung einer maximalen Steifigkeit optimiert. Als Referenz dient ein nicht optimiertes solides Bauteil bei identem Lastfall. Zusätzlich werden die

Optimierungsparameter hinsichtlich minimaler und maximaler Strebenbreite sowie minimaler Strebenabstand definiert. Für die Bauzeitberechnung wird das Bauteil in allen Fällen gleich auf der Bauplatzform positioniert und orientiert damit die Bauzeitauswertung rein auf die Optimierungsgüte zurückzuführen ist.

4.10.6 Kennzahlen am Beispiel eines Hebeltorsos

Basisgeometrie für die Evaluierung der Kennwerte ist ein hypothetischer Hebeltorso (Abb. 4.34). Die Optimierung wird mit Hyperworks 14 (Optistruct) durchgeführt. Verwendet wird ein Volumenmodell mit einer Hexaeder-Vernetzung.

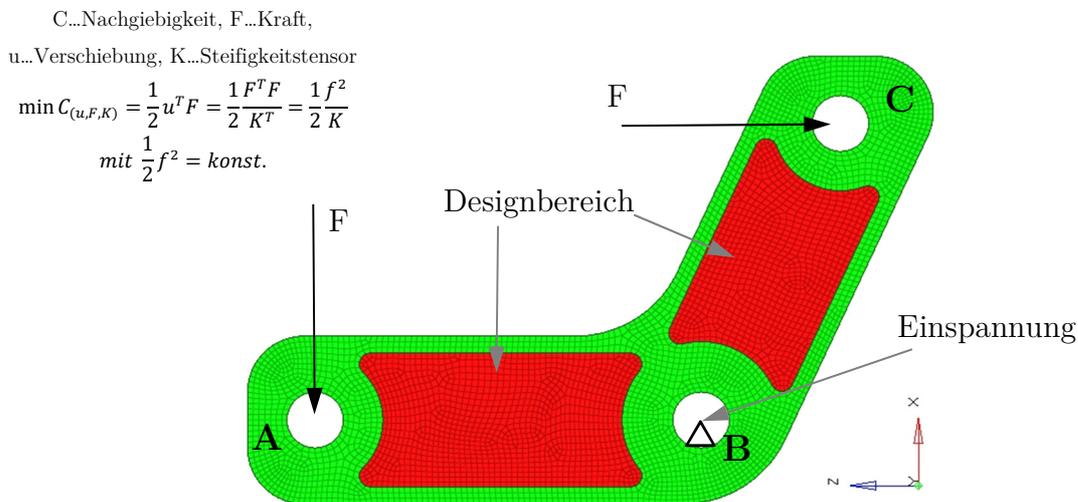


Abb. 4.34: Geometrie (Hebeltorso) für die Kennzahlevaluierung

Der Hebeltorso wird mit einer Kraft F (1000N) an der Bohrung A und C belastet. Die Bohrungen B bildet den Einspannpunkt und wird mit Translations- und Rotationsrestriktionen belegt ($du_x = du_y = du_z = d\varphi_x = d\varphi_y = d\varphi_z = 0$).

Zusätzlich ist die Geometrie in einen Designbereich (rot) und einen non-Designbereich (grün) für die nachfolgende Optimierung eingeteilt. Die Optimierungsparameter für die unterschiedlichen Varianten sind das Zielvolumen des Designbereichs (max. volfrac), Strebenabmessungen und Strebenabstand (min=2mm, max=3mm, mingap=6mm). Zwischen den Varianten werden die Zielvolumina zwischen 0,15 und 0,9 geändert. Die 12 Designvorschläge werden hinsichtlich Spannung ($\sigma_{z,max.HNS}$), Werkstoffausnutzung (Gleichmäßigkeit der Spannungsverteilung), Orientierung im Bauraum (alle Designvorschläge weisen die gleiche Orientierung auf → Unterschiede sind das Resultat der optimierten Struktur) und Bauzeit untersucht. Für die Bestimmung der Kennwerte

wird eine 95%-ige Spannungstoleranz ($\beta=0,95$), eine Schwankungsbreite von $\alpha_{SK} = 10^{-4}$ und eine Streckgrenze von 600MPa (E-Modul 200GPa, CoCr28MoNi, 2.4979 [48]) festgelegt.

Tab. 4.10: Geometriedaten aus Netfabb und der FEA

Nr.	Design	max. Stress	Laserweg [mm]	Nettobauzeit [s]	Anzahl Schichten	Volumen [mm ³]
1	Opt. (0,15)	634,7	5344747,684	4111	3182	10150
2	Opt. (0,20)	617,9	5239021,421	4030	3182	9960
3	Opt. (0,25)	602,1	5190838,158	3992	3182	9860
4	Opt. (0,30)	557	5185921,263	3989	3182	9850
5	Opt. (0,35)	572,5	5225556,421	4019	3182	9930
6	Opt. (0,40)	468,6	5132090,737	3947	3182	9750
7	Opt. (0,45)	466,6	5301696,947	4078	3182	10070
8	Opt. (0,52)	464,8	5108106,316	3929	3182	9710
9	Opt. (0,60)	467	4778994,211	3676	3182	9080
10	Opt. (0,70)	465,8	4362380,579	3355	3182	8290
11	Opt. (0,80)	459,5	4248800,211	3268	3182	8070
12	Opt. (0,90)	459,2	4483641,789	3448	3182	8520
13	Ref. (solid)	455,7	5557468,947	4274	3182	10560

Die Querschnittsschichtdaten und die restlichen notwendigen Geometriedaten werden mit Autodesk Netfabb Standard generiert und ausgewertet. Die aus den Geometriedaten abgeleiteten Rohdaten sind in Tab. 4.10 dargestellt. Für die weiterführende Berechnung werden die maximalen Spannungswerte der Desginvorschläge (bereitgestellt durch die FEA/FEO), der vom Laser abzufahrende gesamte Laserweg (berechnet mittels Netfabb) sowie die Schichtanzahl und das Volumen des jeweiligen Designvorschlags benötigt. Aus diesen Grunddaten werden die jeweiligen Kennzahlen berechnet (Tab. 4.11). Wird die Kennzahl Ω_{ToFe} auf das Referenzdesign normiert ($\Omega_{rel.}$), können die unterschiedlichen Designvorschläge evaluiert werden. Ergebnis ist, dass ein Zielvolumen von 35% des Ursprungsdesignbereiches den besten globalen Kennwert aufweist. Über die Referenzierung des Kennwertes lassen sich drei Optimierungsbereiche ableiten (Abb. 4.35). Der Bereich niedriger relativer Dichte oder eines niedrigen Zielvolumens, ist durch eine zu hohe maximal auftretende Spannung im Bauteil charakterisiert. Eine Dimensionierung des Enddesigns in diesem Bereich würde unweigerlich zum mechanischen Versagen des Bauteils führen.

Tab. 4.11: Kennzahlen und Auswertung für einen optimierten Hebeltorso

Nr.	Design	F_i	W_i	O_i	t_i	M_i	Ω_{ToFe}	$\Omega_{rel.}$
1	Opt. (0,15)	1	0,0005	3,1913	1,0398	123176	222	0,003
2	Opt. (0,20)	1	0,0017	3,1282	1,0607	125526	727	0,01
3	Opt. (0,25)	1	0,0078	3,0994	1,0706	126799	3293	0,04
4	Opt. (0,30)	1	0,9670	3,0965	1,0716	126928	407317	5,5
5	Opt. (0,35)	1	0,9987	3,1202	1,0635	125905	417286	5,7
6	Opt. (0,40)	1	0,2430	3,0643	1,0828	128230	103441	1,4
7	Opt. (0,45)	1	0,2335	3,1655	1,0482	124155	96225	1,3
8	Opt. (0,52)	1	0,2253	3,0500	1,0879	128758	96272	1,3
9	Opt. (0,60)	1	0,2354	2,8533	1,1628	137692	107570	1,5
10	Opt. (0,70)	1	0,2298	2,6045	1,2739	150813	115024	1,6
11	Opt. (0,80)	1	0,2027	2,5369	1,3080	154925	104217	1,4
12	Opt. (0,90)	1	0,2015	2,6768	1,2394	146742	98113	1,3
13	Ref. (solid)	1	0,1879	3,3184	1	118394	73854	1

Der zweite Bereich ist gekennzeichnet durch eine zu großzügige Verteilung von Material. Dies spiegelt sich einerseits in einer hohen relativen Dichte und andererseits in einer wesentlich geringeren maximalen Spannung im Bauteil wieder (Tab. 4.10). Somit hat dieser Designbereich noch deutliche Leichtbaureserven die verwendet werden können. Der optimale Bereich ist durch einen signifikanten Anstieg der globalen Kennzahl Ω_{ToFe} gekennzeichnet. Für die Evaluierungsstudie des Hebeltorsos liegt der optimale Designbereich zwischen 27,5% und 37,5% des Designvolumens.

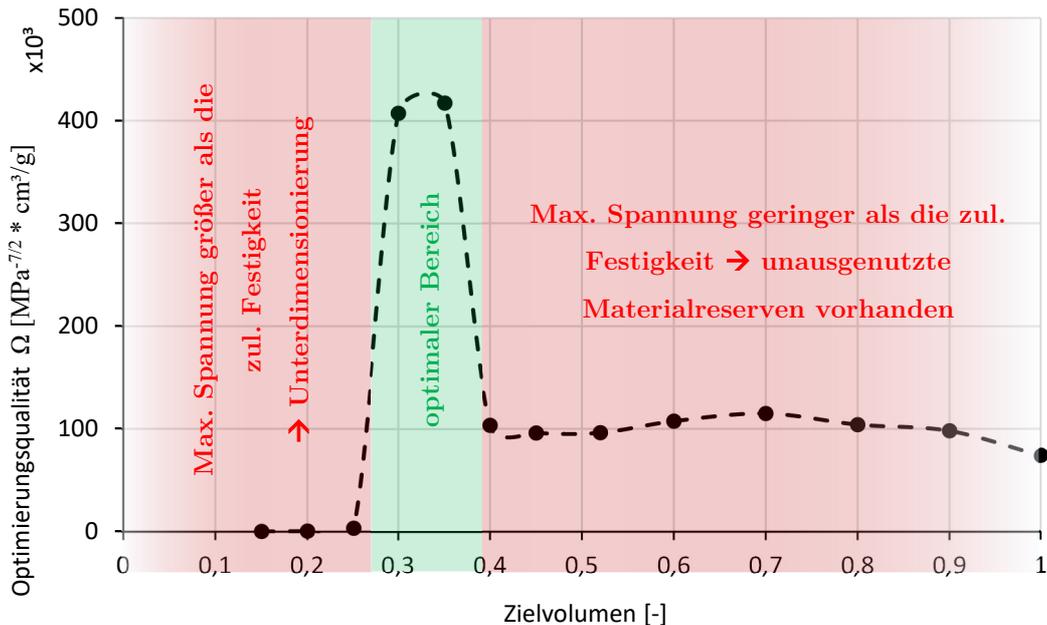


Abb. 4.35: Darstellung der Optimierungsqualität auf der Basis einer Kennzahlenanalyse

5 Diskussion

Die analytische Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Gitterstrukturen zeigt eine gute Übereinstimmung mit den praktischen Versuchen. Die auftretenden Unterschiede sind einerseits auf die Vernachlässigung des Querkraftschubes und andererseits auf die Idealisierung der Materialeigenschaften zurückzuführen. An den Gitterstrukturproben wurde vor der mechanischen Prüfung eine Wärmebehandlung bei 300°C für 1h durchgeführt um die prozessbedingten Eigenspannungen abzubauen. Daraus resultiert eine geringe Abweichung bei den mechanischen Kennwerten der Legierung. Die analytischen und praktischen Erkenntnisse werden weiter für ein automatisiertes Berechnen in einem Matlab Programm verwendet. Diese Software bietet weiter die Möglichkeit die berechneten Gitterstrukturen für eine nachträgliche additive Fertigung oder innerhalb einer FE Simulation zu verwenden.

Die direkte Anwendung von Gitterstrukturen wird anhand einer patentierten multimaterial Hybridverbindung beschrieben. Hierbei wird eine belastbare Verbindung zwischen Kunststoff und Stahl untersucht und hergestellt. Zusätzlich wird der Einfluss unterschiedlicher Geometrien bestimmt. Schlussendlich werden hybride Verbindungen mit einer maximalen Belastbarkeit von 90% des Referenzwertes erreicht.

Die WBH-Studie zeigt, dass ein erheblicher Einfluss der Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften besteht. Einerseits zeigt eine Variation der WBH von 155°C/4h auf 190°C/16h keine nennenswerten Änderungen der Gefügeausbildung. Andererseits verhält sich das L-PBF Gefüge bei einem vorangegangenen Lösungsglühen deutlich unterschiedlich. Abb. 4.23 c) und d) zeigen, dass das L-PBF Gefüge vollkommen verschwindet. Stattdessen entstehen prismatische Si-Kristalle eingebettet im Al-Mischkristall. Die Änderung der WBH Parameter von 155°C/4h auf 190°C/16h bewirkt hierbei ein stärkeres Wachstum der Si-Kristalle. Die Betrachtung der Festigkeit zeigt, dass ein konventionell (z.B. HPDC) hergestelltes Bauteils aus AlSi10Mg eine Festigkeit von ca. 350MPa besitzt. [87] Unbehandeltes AlSi10Mg (L-PBF) hingegen weist nach dem Bau bereits eine Festigkeit von ca. 400MPa auf, was einer Härte von ca. 127HV

entspricht. [87] Nach einer entsprechenden T5 WBH werden Festigkeiten von max. 440MPa erreicht werden. Eine T6 WBH hingegen führt zu einer Abnahme der Ausgangsfestigkeit auf ca. 300-320MPa.

Die Konstruktionsrichtlinien für die Anwendung von Gitterstrukturen in der additiven Fertigung werden auf der Grundlage unterschiedlicher Versuchsreihen entwickelt. Es werden erweiterte Richtlinien für allgemeine Baufehler, Strukturwinkel, Strebendurchmesser und die Oberflächenqualität von additiv gefertigten Gitterstrukturen beschrieben.

Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Gitterstrukturen und der Wärmebehandlungsstudie in Verbindung mit dem additiven schichtweisen Prozessprinzip in neue prozessspezifische Kennzahlen für die Beurteilung von additiv gefertigten Gitterstrukturen und deren Materialeffizienz und Optimierungspotential zusammengefasst.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit werden wesentliche Neuerungen für die Entwicklung von Gitterstrukturen in optimierten Bauteilen erarbeitet. Die Basis bildet die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Gitterstrukturen. Diese sind unerlässlich für eine Verwendung in Strukturbauteilen. Die Validierung der analytischen Berechnungsmethoden erfolgt durch eine Gegenüberstellung mit praktischen Versuchen. Diese Gegenüberstellung zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten Eigenschaften mit den praktisch bestimmten Werten. Zusammengefasst werden diese Erkenntnisse für die automatisierte Berechnung in einer neuen Software (LPCalcV0.1) mittels MatLab. Diese Software liefert, auf der Grundlage von wenigen Eingabeparametern für die jeweilige Gitterstruktur (u.a. Strebenlänge und Strebendurchmesser), die mechanischen Kennwerte wie Plateauspannung, den relativen Elastizitätsmodul und die relative Dichte. Zusätzlich kann die Einheitszelle der gewünschten Gitterstruktur als STL oder BDF Datei für eine nachträgliche Verwendung exportiert werden. Die STL-Datei ermöglicht die Anwendung der Einheitszelle in anderen CAD Programmen. Die BDF-Datei ist eine Netzdatei und wird für eine strukturmechanische Simulation verwendet.

Nach der analytischen Auslegung von Bauteilen und Gitterstrukturen ist deren Materialeffizienz von entscheidender Bedeutung. Hierfür werden neue Kennzahlen entwickelt, um die Prozesseigenschaften der additiven Fertigung, die Optimierungsqualität und die Gesamtperformance unterschiedlicher optimierter Designs gegenüberzustellen und zu bewerten. Abschließend wird der Werkstoff hinsichtlich Leichtbaueignung und Mikrostruktur untersucht. Es wird gezeigt, dass eine entsprechende Wärmebehandlung additiv gefertigter optimierter Bauteile und Gitterstrukturen einen entscheidenden Einfluss auf die Mikrostruktur, die mechanischen Eigenschaften und somit auch auf die Gitterstruktur hat. So führt eine T5 Wärmebehandlung zu einer zu einer Erhöhung der Festigkeit und einer Verringerung der Bruchdehnung und eine T6 Wärmebehandlung zu einer Verringerung der Festigkeit und einer Erhöhung der Bruchdehnung ausgehend vom „as-build“ Zustand. Weiters wurde

bei einer T6 Wärmebehandlung die Entstehung von massiven Siliziumausscheidungen beobachtet, was auf das Lösungsglühen zurückzuführen ist.

Die vorliegende Arbeit bietet eine neue Methodik zur geführten Entwicklung und Optimierung von Leitbauteilen mit Gitterstrukturen unter der Berücksichtigung der additiven Fertigungstechnologie. Offene Themengebiete in diesem Zuge sind die analytische Bestimmung und Berücksichtigung der Interaktion von Laserstrahlung mit Metallpulver im additiven Fertigungsprozess (inkl. Mehrfachreflexion) sowie die Entwicklung neuer Anlagenkonzepte um die Werkstoffpalette auf höherkohlige Werkzeugstähle oder Hartmetalle auszuweiten. Zusätzlich ist der Einfluss unterschiedlicher Pulvergrößenfraktionen auf die Verarbeitbarkeit im additiven Fertigungsprozess von entscheidender Bedeutung.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Schema für die Geometrieerstellung von optimierten AM-Bauteilen	1
Abb. 3.1: Schmelzbadströmung beim Laserschweißen [134]	6
Abb. 3.2: Erweiterte Darstellung der Abhängigkeit der Erstarrungsmorphologie von der Erstarrungsgeschwindigkeit und vom Temperaturgradienten (basierend auf der Originaldarstellung nach W. Kurz und D.J. Fisher [163])	7
Abb. 3.3: Datenfluss bei der additiven Fertigung – von der Idee zum Bauteil. [44]	10
Abb. 3.4: Erzeugung einer STL Datei.	11
Abb. 3.5: Unterschied zwischen einem groben und einem feinen STL Datensatz.	11
Abb. 3.6: Absorbtionsgrade von Metallpulvern für einige Lasertypen [39]	15
Abb. 3.7: Beispiele für die Sandwich – Kernbauweise [83]	19
Abb. 3.8: Biegung eines Balkens bestehend aus drei Komponenten – Absenkung bei a) ohne Reibung $\Delta u=2,1\text{mm}$ und bei b) mit Reibung $\mu=1$ $\Delta u=0,3\text{mm}$. (Simuliert mit Abaqus 6.14).....	19
Abb. 3.9: Formfaktoren nach Ashby - Grundprinzip [103].....	20
Abb. 3.10: Beispiel einer hierarchischen Honeycomb Struktur [164].....	21
Abb. 3.11: Kragträger für die Optimierung – Ausgangssituation.....	23
Abb. 3.12: Graphische Lösung des Kragträgers	24
Abb. 3.13: Einfluss des P-Exponenten auf die Dichtesensitivität	29
Abb. 3.14: Optimierter Biegeträger mit Gitterstrukturen.....	31
Abb. 3.15: Berechnungsschema für die Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Gitterstrukturen nach M. Ashby.....	34
Abb. 3.16: Auszug unterschiedlicher Zelltypen und Evaluierung für die additive Fertigung	38
Abb. 3.17: Einteilung der Aluminiumlegierungen [16].....	40
Abb. 3.18: Schlifffbilder von AlSi13 (links unveredelt, rechts veredelt mit Natrium) [71]	41
Abb. 3.19: kubisch flächenzentriertes Kristallgitter - Aluminium [16, 55]	42
Abb. 3.20: v.l.n.r. Phasendiagramm Al-Si und mögliche Erstarrungsgefüge des Al-Si Eutektikums [114, 142]	43
Abb. 3.21: Quasibinäres Phasendiagramm von Al-Mg ₂ Si [71, 84]	45
Abb. 3.22: Wärmebehandlung von AlSiMg Legierungen [16].....	46
Abb. 3.23: Relative Härtesteigerung durch Kaltauslagerung bei AlSiMg-Legierungen ..	47
Abb. 3.24: Exemplarisches ZTA für β'' einer AlSiMg Legierung (berechnet mit MATCALC)[114].....	49
Abb. 3.25: DSC Kurve der Aluminiumlegierung AA6110 [80]	50

Abb. 3.26: Veränderung der Zellgröße bei sehr rascher Erstarrung [69].....	51
Abb. 3.27: Mikrostruktur eines L-PBF-gefertigten AlSi10Mg Bauteils – ohne WBH....	53
Abb. 3.28: Auxethisches Verhalten einer Fachwerkstruktur bei uniaxialer Belastung. (Rahmenanalyse durchgeführt mit Autodesk Nastran In-CAD)	55
Abb. 3.29: Bestimmung der Verbindungssteifigkeit	58
Abb. 3.30 Beispiel einer möglichen zellulären Kühlgeometrie	58
Abb. 3.31: Simulation der Strömung durch Gitterstrukturen. Dargestellt ist auf der horizontalen Ebene die Verwirbelung des Fluids und auf der vertikalen Ebene die Fluidgeschwindigkeit.	59
Abb. 3.32: Ergebniss einer Optimierung hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit mittels Top3D [88].....	61
Abb. 3.33: Temperaturüberhöhung einer Kühlnadel im Reihenverbund (>10 Streben) mit einem Durchmesser von 3,08mm, einer Strebenlänge von 8mm und einer Kühl- wassergeschwindigkeit im Einlass von 1cm/s.....	62
Abb. 3.34: Wirkungsgrad von Kühlnadeln in Abhängigkeit von der Geometrie [73].....	63
Abb. 3.35: Themenschema für die Entwicklung von additiv gefertigten Hochleistungskühleinsätzen für den Werkzeugbau.....	64
Abb. 3.36: Darstellung der Wirkungsweise eines Thermosiphons (links) und einer Heatpipe (rechts). [133]	69
Abb. 4.1: Rhombisch-Dodekaedrische Einheitszelle	70
Abb. 4.2: Systemskizze eines Stabes der rhombisch-dodekaedrischen Einheitszelle.....	71
Abb. 4.3: Verlauf der relativen Querschnittsfläche über die Zellhöhe.....	71
Abb. 4.4: Stauchprobengeometrie: Einheitszellengröße 5mm, $d=0,786\text{mm} - 1,039\text{mm}$, $l=2,165\text{mm}$, Zellenanzahl: 10x10x5	72
Abb. 4.5: Deformationssequenz beim Stauchen eines Gitterwürfels (50x50x25mm) mit einer relativen Dichte von 25%. a) Ausgangszustand; b) Ausbauchen des Gitterkörpers ohne Umklappen; c) Umklappen der ersten Gitterreihe; d) Umklappen der zweiten Gitterreihe; e) Umklappen und Verdichten; f) weiteres Umklappen und Verdichten; g) Verdichten; h) vollständig verdichtet.....	73
Abb. 4.6: Spannungsverlauf der Stauchversuche von Proben mit unterschiedlichen relativen Dichten. (Angegebene Spannungswerte wurden auf die reale Querschnittsfläche der Einheitszelle umgerechnet)	74
Abb. 4.7: Bestimmung der Parameter n und p für den Elastizitätsmodul.....	75
Abb. 4.8: Bestimmung der Parameter n und p für die Plateauspannung.	76
Abb. 4.9: Vergleich zwischen analytisch und praktisch bestimmten Gittereigenschaften.	77
Abb. 4.10: Eingabemaske von LPCalcV0.1	77
Abb. 4.11: Blockdiagramm von LPCalcV0.1	78
Abb. 4.12: Matlab Codesegment für die E-Modul Bestimmung.....	79
Abb. 4.13: STL Datensatz einer rhomboedrisch dodekaedrischen Einheitszelle.....	80
Abb. 4.14: Algorithmus für BDF Export und Darstellung der Einheitszelle in HyperMesh.....	81

Abb. 4.15: Beispielgeometrie für die Hybridverbindung mit einer normal zur Belastungsrichtung orientierten Übergangszone. Probenquerschnitt beträgt 4x10mm – a...Länge der Übergangszone [mm], b...halbe parallele Länge der Zugprobe [mm], c...halbe Zugprobenlänge [mm], z...Größe der Einheitszelle [mm], l...Strebenlänge [mm], d...Strebendurchmesser [mm].....	83
Abb. 4.16: Fertige Zugprobe mit Hybridverbindung zwischen Metall und Kunststoff ..	84
Abb. 4.17: Verbindungssteifigkeit unterschiedlicher Zelltypen im Vergleich zur Referenz-Kunststoff-Zugprobe.	85
Abb. 4.18: Zugfestigkeit der unterschiedlichen Hybridverbindungen im Vergleich zur Referenz-Kunststoff-Zugprobe.	85
Abb. 4.19: Vergleich des Bruchverhaltens der unterschiedlichen Übergangszonen: a)10x8 ³ , b)z8A and c)z8V.....	86
Abb. 4.20: Versuchsmatrix für Wärmebehandlungsstudie – T5 + T6	87
Abb. 4.21: Phasendiagramm der untersuchten Aluminiumlegierung AlSi10Mg (AM) mit 10wt% Si und 0,5wt% Mg (berechnet mit MatCalc V6) [114]	88
Abb. 4.22: Lichtbildaufnahme des L-PBF Gefüges von AlSi10Mg: a) Draufsicht und b) Seitenansicht.....	89
Abb. 4.23: REM Aufnahmen bei a) 4h @ 155°C b) 16h @ 190°C c) 4h @ 155°C + LG und d) 16h @ 190°C + LG.	90
Abb. 4.24: Resultierende Zugfestigkeit R_m und Streckgrenze R_e nach einer Wärmebehandlung ohne Lösungsglühen (T5)	91
Abb. 4.25: Resultierende Zugfestigkeit R_m und Streckgrenze R_e nach einer Wärmebehandlung mit Lösungsglühen (T6)	92
Abb. 4.26: Abhängigkeit der relativen Dichte vom Hatchabstand $h[\mu\text{m}]$ für den Werkstoff AlSi10Mg (Laserleistung $P=370\text{W}$, Scangeschwindigkeit $v=1450\text{mm/s}$).....	94
Abb. 4.27: Parametermatrix für die Parametereinflussstudie (std. Parametersatz gelb markiert).....	95
Abb. 4.28: Schliffbild für die Porositätsbestimmung mit 88% relative Dichte.....	96
Abb. 4.29: Auswertung der relativen Dichte in Abhängigkeit von Laserleistung und Scangeschwindigkeit	96
Abb. 4.30: Probekörper für die Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für Gitterstrukturen – a) Neigung, Oberfläche und Überhang b) minimale Wandstärke und Durchmesser.	97
Abb. 4.31: Strukturelle Aufbaufehler einer Gitterstruktur. Bei der Unterschreitung der Fertigungs- bzw. Auflösungsgrenzen des Fertigungsprozesses vermehrtes Auftreten von Gitterfehlern.	98
Abb. 4.32: Topographische Aufnahme einer Gitterstruktur für die Bestimmung des Strukturwinkels und Validierung der Bauergebnisse.....	98
Abb. 4.33: Kennzahl für die Werkstoffausnützung im Design. (tol: $\alpha_0=10^{-4}$, $\beta=0,95$, tol_sharp: $\alpha_0=10^{-3}$, $\beta=0,95$)	102
Abb. 4.34: Geometrie (Hebeltorso) für die Kennzahlevaluierung.....	105

Abb. 4.35: Darstellung der Optimierungsqualität auf der Basis einer Kennzahlanalyse
.....107

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Designrichtlinien für die additive Fertigung [44, 45]	9
Tab. 3.2: Vor- und Nachteile der additiven Fertigungstechnologien im Hinblick auf fünf Kernelemente des klassischen Leichtbaus.....	13
Tab. 3.3: Preistabelle einiger gängiger Werkstoffe für die additive Fertigung [46, 50] ..	17
Tab. 3.4: Optimierungsparameter	32
Tab. 3.5: Analytische Berechnung der mech. Eigenschaften von Zellstrukturen.	35
Tab. 3.6: Einteilung von zellulären Strukturen	37
Tab. 3.7: Einteilung der Elemente nach ihrer Löslichkeit in Aluminium. E=eutektisch, P=peritektisch, M=monotektisch [57]	40
Tab. 3.8: Ausgewählte physikalische Eigenschaften von Aluminium [16, 55]	42
Tab. 3.9: mech. Kennwerte einer AlSi10Mg (EN AC-43000) Legierung. Vergleich zwischen Gussgefüge und WBH-Gefüge [117].....	45
Tab. 3.10: Werkstoffparameter für die Bestimmung der lokalen Erstarrungszeit von Aluminiumlegierungen [14]	52
Tab. 3.11: Tabellenwerte für m und c für eine fluchtende Anordnung [73]	59
Tab. 3.12: Tabellenwerte für den Reihenfaktor abhängig von der Reihenanzahl [73]	60
Tab. 3.13: Wärmelkeitfähigkeit für Gitter mit 30% rel. Dichte	61
Tab. 3.14: Werkstoffe für Wärmerohre [13, 133]	68
Tab. 4.1: Ergebnisse der Stauchversuche für Gitter mit unterschiedlichen relativen Dichten	75
Tab. 4.2: geometrische Versuchsdaten für die Basis-Testserie.	82
Tab. 4.3: geometrische Versuchsdaten für die zweite Testserie.	83
Tab. 4.4: Prozessparameter für den Spritzguss der Hybridverbindung.	84
Tab. 4.5: Auflistung der WBH-Versuchsreihen	88
Tab. 4.6: L-PBF Parameter für AlSi10Mg	93
Tab. 4.7: Oberflächenrauheit bei additiv gefertigten Gitterstrukturen	100
Tab. 4.8: Designrichtlinien für die additive Fertigung	100
Tab. 4.9: Kennzahlen für optimierte AM-Bauteile.....	101
Tab. 4.10: Geometriedaten aus Netfabb und der FEA	106
Tab. 4.11: Kennzahlen und Auswertung für einen optimierten Hebeltorso	107

9 Literaturverzeichnis

- [1] A. Baumgartner, L. Harzheim, C. Mattheck. SKO (soft kill option). The biological way to find an optimum structure topology. *International Journal of Fatigue* 14, 6, 387–393. 1992.
- [2] A. Fortunato, G. Cuccolini, A. Ascari, L. Orazi, G. Campana, G. Tani. Hybrid metal-plastic joining by means of laser. *International Journal of Material Forming* 3, S1, 1131–1134. 2010.
- [3] A. Harnischmacher: *Schädigung der Lebensdauer von Aluminium-Gusslegierungen für thermisch-mechanisch hochbeanspruchte Motorbauteile*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2013.
- [4] A. Liu, C.K. Chua, K.F. Leong. Properties of Test Coupons Fabricated by Selective Laser Melting. *Key Engineering Materials* 447-448, 780–784. 2010.
- [5] A. Roesner, S. Scheik, A. Olowinsky, A. Gillner, U. Reisgen, M. Schleser. Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids. *Physics Procedia* 12, 370–377. 2011.
- [6] A.A. Joraid. Limitation of the Johnson–Mehl–Avrami (JMA) formula for kinetic analysis of the crystallization of a chalcogenide glass. *Thermochimica Acta* 436, 1-2, 78–82. 2005.
- [7] A.B. Abibe, S.T. Amancio-Filho, J.F. dos Santos, E. Hage. Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–metal staked joints. *Materials & Design* 46, 338–347. 2013.
- [8] A.D. Kraus, A. Aziz, and J.R. Welty: *Extended surface heat transfer*. A Wiley-Interscience publication. Wiley, New York, NY. 2001.
- [9] Altair: *Hyperworks 14*. <http://www.altairhyperworks.de/hw14/>. Accessed May 2016.
- [10] Autodesk: *Within*. <http://www.autodesk.com/products/within/overview>. Accessed May 2016.
- [11] Autodesk: *Netfabb. Additive manufacturing and design software*. 2018.
- [12] B. Klein: *Leichtbau-Konstruktion*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. 2013.

- [13] B. Zohuri: *Heat pipe design and technology. A practical approach*. CRC Press, Boca Raton, Fla. 2011.
- [14] BDG-Informationszentrum Giesserei: *Bestimmung des Dendritenarmabstandes für Gussstücke aus Aluminium-Gusslegierungen. BDG-Richtlinie*. VDG-Merkblatt P220. BDG. 2011.
- [15] C. Herrmann, H. Pries, and G. Hartmann: *Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss*. SpringerLink : Bücher. Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. 2013.
- [16] C. Kammer: *Aluminium-Taschenbuch. Band 1 - Grundlagen und Werkstoffe*. Aluminium-Verl., Düsseldorf. 2002.
- [17] C. Mattheck. Design and growth rules for biological structures and their application to engineering. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures* 13, 5, 535–550. 1990.
- [18] C. Mattheck: *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*. Rombach Wissenschaften : ..., Reihe Ökologie Bd. 1. Rombach, Freiburg im Breisgau. 1997.
- [19] C. Mattheck. Teacher tree. The evolution of notch shape optimization from complex to simple. *Engineering Fracture Mechanics* 73, 12, 1732–1742. 2006.
- [20] C. Mattheck, D. Reuschel. Design nach der Natur. *Physik in unserer Zeit* 30, 6, 253–258. 1999.
- [21] C. Mattheck, K. Bethge. Zur Plausibilität der Methode der Zugdreiecke. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 36, 11, 748–749. 2005.
- [22] C. Mattheck, M. Scherrer, I. Tesari. Kerbspannungen sind Biegespannungen – was sind gute und böse Kerben? *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 34, 4, 427–429. 2003.
- [23] C. Mattheck, M. Scherrer, I. Tesari, O. Kraft. Kerbformoptimierung ohne FEM. Ein einfacher Weg, um Kerbspannungen abzubauen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 34, 5, 514–515. 2003.
- [24] C. Qiu, S. Yue, N.J.E. Adkins, M. Ward, H. Hassanin, P.D. Lee, P.J. Withers, M.M. Attallah. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A* 628, 188–197. 2015.
- [25] C. Suryanarayana. Mechanical behavior of emerging materials. *Materials Today* 15, 11, 486–498. 2012.

- [26] C. Weingarten, D. Buchbinder, N. Pirch, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology* 221, 112–120. 2015.
- [27] D. Buchbinder: *Selective Laser Melting von Aluminiumgusslegierungen*. Berichte aus der Lasertechnik. Shaker, Aachen. 2013.
- [28] D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners, J. Bültmann. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. *Physics Procedia* 12, 271–278. 2011.
- [29] D. Carle, G. Blount. The suitability of aluminium as an alternative material for car bodies. *Materials & Design* 20, 5, 267–272. 1999.
- [30] D. Weaire. Some remarks on the arrangement of grains in a polycrystal. *Metallography* 7, 2, 157–160. 1974.
- [31] D.A. Aboav. The arrangement of grains in a polycrystal. *Metallography* 3, 4, 383–390. 1970.
- [32] D.A. Aboav. The arrangement of cells in a net. *Metallography* 13, 1, 43–58. 1980.
- [33] D.A. Aboav. The arrangement of cells in a net. II. *Metallography* 16, 3, 265–273. 1983.
- [34] D.A. Aboav. The arrangement of cells in a net. III. *Metallography* 17, 4, 383–396. 1984.
- [35] D.A. Aboav. The arrangement of cells in a net. IV. *Metallography* 18, 2, 129–147. 1985.
- [36] D.A. Aboav. The stereology of the intergranular surface of a metal. *Acta Stereologica*. 1991.
- [37] D.A. Aboav. The Topology of a Polycrystal in Three Dimensions. *Materials Science Forum* 94-96, 275–280. 1992.
- [38] DKI: *CuNi10Fe1Mn*. *Werkstoffdatenblatt*. 2005.
- [39] E. Beyer: *Schweißen mit Laser. Grundlagen*. Laser in Technik und Forschung. Springer, Berlin, Heidelberg. 1995.
- [40] E. Brandl, U. Heckenberger, V. Holzinger, D. Buchbinder. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM). Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design* 34, 159–169. 2012.

- [41] E. Ptochos, G. Labeas. Elastic modulus and Poisson's ratio determination of micro-lattice cellular structures by analytical, numerical and homogenisation methods. *Jnl of Sandwich Structures & Materials* 14, 5, 597–626. 2012.
- [42] E. Rodríguez-Vidal, J. Lambarri, C. Soriano, C. Sanz, G. Verhaeghe. A Combined Experimental and Numerical Approach to the Laser Joining of Hybrid Polymer – Metal Parts. *Physics Procedia* 56, 835–844. 2014.
- [43] E. Skiera: *Thermomechanische Charakterisierung neu entwickelter Feuerfestwerkstoffe*. Forschungszentrum Jülich. 2012.
- [44] EOS GmbH - Electro Optical Systems: *Design Rules - application notes*. EOS GmbH - Electro Optical Systems, München. 2004.
- [45] EOS GmbH - Electro Optical Systems: *DMLS Design-Rules*, München. 2004.
- [46] EOS GmbH - Electro Optical Systems: *Material Price List CE*. 2014.
- [47] EOS GmbH - Electro Optical Systems: *EOS Aluminium AlSi10Mg - Leichtmetall für Motorsport und Luft- und Raumfahrt. Materialdatenblatt*, München. 2017.
- [48] EOS GmbH - Electro Optical Systems: *EOS CobaltChrome MP1 - CoCrMo Superlegierung für hochtemperatur Anwendung und biomedizinische Implantate. Materialdatenblatt*, München. 2017.
- [49] EOS GmbH - Electro Optical Systems: *EOS MaragingSteel MS1 - Hochleistungsstahl für Werkzeug- und Maschinenbau. Materialdatenblatt*, München. 2017.
- [50] EOS GmbH - Electro Optical Systems: *Material Preisliste Metall - CE*. 2017.
- [51] Erl GmbH SCHWEISSEN+SCHNEIDEN: *Erklärungen zur Streckenenergie*. <http://www.erl-gmbh.de/home/fachwissen/berechnungen/streckenenergie/erklarungen.html>. Accessed 13 August 2015.
- [52] F. Lambiase. Joinability of different thermoplastic polymers with aluminium AA6082 sheets by mechanical clinching. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 80, 9-12, 1995–2006. 2015.
- [53] F. Lambiase. Mechanical behaviour of polymer–metal hybrid joints produced by clinching using different tools. *Materials & Design* 87, 606–618. 2015.
- [54] F. Lambiase, A. Di Ilio. Mechanical clinching of metal–polymer joints. *Journal of Materials Processing Technology* 215, 12–19. 2015.
- [55] F. Ostermann: *Anwendungstechnologie Aluminium*. VDI-Buch. Springer, Berlin [u.a.]. 2007.

- [56] F.C. Liu, J. Liao, K. Nakata. Joining of metal to plastic using friction lap welding. *Materials & Design* 54, 236–244. 2014.
- [57] F.H. Froes, Y.W. Kim, S. Krishnamurthy. Rapid solidification of lightweight metal alloys. *Materials Science and Engineering: A* 117, 19–32. 1989.
- [58] G. Campoli, M.S. Borleffs, S. Amin Yavari, R. Wauthle, H. Weinans, A.A. Zadpoor. Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing. *Materials & Design* 49, 957–965. 2013.
- [59] G. Fischer, Ed.: *Strangpressen*. DGM-Informationsges, Frankfurt am Main. 1997.
- [60] G. Reitter: *Leichtbau durch Sicken*. <http://www.4ming.de/index.php/leichtbau-durch-sicken-fachbuch?start=5>. Accessed May 2016.
- [61] G. Vincze, I. Zsoldos, A. Szasz. On the Aboav–Weaire law. *Journal of Geometry and Physics* 51, 1, 1–12. 2004.
- [62] G.A. Dambauer, T. Pabel, P. Schumacher. Optimierung der Wärmebehandlungsparameter der Legierung EN AC- AlSi7Mg0,x . *Giesserei-Rundschau*, 53, 50–56. 2006.
- [63] G.A. Edwards, K. Stiller, G.L. Dunlop, M.J. Couper. The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia* 46, 11, 3893–3904. 1998.
- [64] H. Brauer, B. Brander. Strömung um Rohrreihen und durch Rohrbündel sowie Wärmeübergang im Bereich niedriger Werte der Reynolds-Zahl. Teil 3: Freiumströmte und durchströmte Rohrbündel mit versetzter Anordnung der Rohre. *Forsch Ing-Wes* 59, 10, 204–216. 1993.
- [65] H. Brauer, B. Brander. Strömung um Rohrreihen und durch Rohrbündel sowie Wärmeübergang im Bereich niedriger Werte der Reynolds-Zahl. Teil 4: Rohrbündel mit versetzter Rohranordnung und seitlicher Begrenzung. *Forsch Ing-Wes* 59, 11-12, 234–246. 1993.
- [66] H. Brauer, T.H. Kim. Strömung um Rohrreihen und durch Rohrbündel sowie Wärmeübergang im Bereich niedriger Werte der Reynolds-Zahl. Teil 1: Eine Reihe mit fluchtender Anordnung der Rohre. *Forschung im Ingenieurwesen* 59, 7-8, 129–153. 1993.
- [67] H. Brauer, T.H. Kim. Strömung um Rohrreihen und durch Rohrbündel sowie Wärmeübergang im Bereich niedriger Werte der Reynolds-Zahl. Teil 2: Zwei parallele Reihen mit fluchtender Anordnung der Rohre. *Forschung im Ingenieurwesen* 59, 9, 173–183. 1993.

- [68] H. J. Wang, H. C. Tsai, H. K. Chen, T. K. Shing. Capillarity of rectangular micro grooves and their application to heat pipes. *Journal of Science and Engineering*, 8, 249–255. 2005.
- [69] H. Jones. Microstructure of rapidly solidified materials. *Materials Science and Engineering* 65, 1, 145–156. 1984.
- [70] H. Jones. Formation of microstructure in rapidly solidified materials and its effect on properties. *Materials Science and Engineering: A* 137, 77–85. 1991.
- [71] H. Oettel, Ed.: *Metallografie*. Master. Wiley-VCH-Verl., Weinheim. 2011.
- [72] H. Wang, W. Jiang, J. Ouyang, R. Kovacevic. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW. *Journal of Materials Processing Technology* 148, 1, 93–102. 2004.
- [73] H. Windisch: *Thermodynamik. Ein Lehrbuch für Ingenieure*. Naturwissenschaft und Technik 1/2010. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München. 2009.
- [74] H.H. Braess and U. Seiffert: *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Mit 50 Tabellen*. ATZ-MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2013.
- [75] H.J. Bargel and G. Schulze: *Werkstoffkunde*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin. 2012.
- [76] H.P. Degischer and S. Lüftl: *Leichtbau. Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Wiley-VCH, Weinheim. ©2009.
- [77] H.W. Bergmann, H.U. Fritsch, G. Hunger. Calculation of cooling and heating rates and transformation curves for the preparation of metallic glasses. *Journal of Materials Science* 16, 7, 1935–1944. 1981.
- [78] H.W. Rockenschaub. Charakterisierung der Kolbengusslegierung AlSi12CuNiMg. Teil 1: Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften bei Klatauslagerung. *Giesserei Praxis*, 2, 13–25. 2008.
- [79] H.W. Rockenschaub. Charakterisierung der Kolbengusslegierung AlSi12CuNiMg. Teil 2: Einfluss einer Zwischenlagerung und statische mechanische Eigenschaften nach T5-Wärmebehandlung, TEM-Untersuchung der Ausscheidungen. *Giesserei Praxis*, 3, 68–73. 2008.
- [80] J. Kongthep, P. Juijerm. Kinetics of precipitation hardening phase in aluminium alloy AA 6110. *Materials Science and Technology* 30, 14, 1815–1819. 2014.
- [81] J. S. Arora: *Introduction to optimum design*. Academic Press is an imprint of Elsevier, Amsterdam, Boston. 2017.

- [82] J. Shen: *Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung bei gleichzeitiger Pulverzufuhr*. Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. 1994.
- [83] J. Wiedemann: *Leichtbau. Elemente und Konstruktion*. Springer, Berlin, New York. 2007.
- [84] J. Zhang, Z. Fan, Y.Q. Wang, B.L. Zhou. Equilibrium pseudobinary Al–Mg 2 Si phase diagram. *Materials Science and Technology* 17, 5, 494–496. 2001.
- [85] J.P. Bergmann, M. Stambke. Potential of Laser-manufactured Polymer-metal hybrid Joints. *Physics Procedia* 39, 84–91. 2012.
- [86] K. Kempen, L. Thijs, E. Yasa, M. Badrossamay, W. Verheecke, J.P. Kruth. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. *Solid Freeform Fabrication Symposium* 2011, 22, 484–495.
- [87] K. Kempen, L. Thijs, J. van Humbeeck, J.P. Kruth. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia* 39, 439–446. 2012.
- [88] K. Liu, A. Tovar. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 50, 6, 1175–1196. 2014.
- [89] K. Mori, K. Akita, Y. Abe. Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 2, 321–325. 2007.
- [90] K. Schmidtke, F. Palm, A. Hawkins, C. Emmelmann. Process and Mechanical Properties. Applicability of a Scandium modified Al-alloy for Laser Additive Manufacturing. *Physics Procedia* 12, 369–374. 2011.
- [91] K. Schricker, M. Stambke, J.P. Bergmann, K. Bräutigam, P. Henckell. Macroscopic Surface Structures for Polymer-metal Hybrid Joints Manufactured by Laser Based Thermal Joining. *Physics Procedia* 56, 782–790. 2014.
- [92] K.G. Prashanth, S. Scudino, H.J. Klauss, K.B. Surreddi, L. Löber, Z. Wang, A.K. Chaubey, U. Kühn, J. Eckert. Microstructure and mechanical properties of Al–12Si produced by selective laser melting. Effect of heat treatment. *Materials Science and Engineering: A* 590, 153–160. 2014.
- [93] K.H. Matlack, A. Bauhofer, S. Krödel, A. Palermo, C. Daraio. Composite 3D-printed metastructures for low-frequency and broadband vibration absorption. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113, 30, 8386–8390. 2016.

- [94] K.M. Kim, Y.S. Jeong, I.G. Kim, I.C. Bang. Comparison of thermal performances of water-filled, SiC nanofluid-filled and SiC nanoparticles-coated heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 88, 862–871. 2015.
- [95] L. Lévesque. Law of cooling, heat conduction and Stefan-Boltzmann radiation laws fitted to experimental data for bones irradiated by CO₂ laser. *Biomedical optics express* 5, 3, 701–712. 2014.
- [96] L. Thijs, K. Kempen, J.P. Kruth, J. van Humbeeck. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia* 61, 5, 1809–1819. 2013.
- [97] L.E. Loh, Z.H. Liu, D.Q. Zhang, M. Mapar, S.L. Sing, C.K. Chua, W.Y. Yeong. Selective Laser Melting of aluminium alloy using a uniform beam profile. *Virtual and Physical Prototyping* 9, 1, 11–16. 2014.
- [98] L.J. Gibson. Biomechanics of cellular solids. *Journal of biomechanics* 38, 3, 377–399. 2005.
- [99] L.J. Gibson, M.F. Ashby. The Mechanics of Three-Dimensional Cellular Materials. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 382, 1782, 43–59. 1982.
- [100] L.J. Gibson and M.F. Ashby: *Cellular solids. Structure and properties*. Cambridge solid state science series. Cambridge University Press, Cambridge, New York. 1999.
- [101] L.P. Lam, D.Q. Zhang, Z.H. Liu, C.K. Chua. Phase analysis and microstructure characterisation of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting. *Virtual and Physical Prototyping* 10, 4, 207–215. 2015.
- [102] LBC - LaserBearbeitungsCenter GmbH: *Materialdatenblatt 1.2709. Werkstoffkenndaten*.
- [103] M. F. Ashby, H. Shercliff, and D. Cebon: *Materials. Engineering, science, processing and design*. Elsevier, Amsterdam. 2008.
- [104] M. Grujicic, V. Sellappan, G. Arakere, N. Seyr, A. Obieglo, M. Erdmann, J. Holzleitner. The Potential of a Clinch-Lock Polymer Metal Hybrid Technology for Use in Load-Bearing Automotive Components. *Journal of Materials Engineering and Performance* 18, 7, 893–902. 2009.
- [105] M. Link: *Finite Elemente in der Statik und Dynamik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. 2014.

- [106] M.A. Otooni: *Elements of Rapid Solidification. Fundamentals and Applications*. Springer Series in Materials Science 29. Springer, Berlin, Heidelberg. 1998.
- [107] M.C. Weinberg, D.P. Birnie, V.A. Shneidman. Crystallization kinetics and the JMAK equation. *Journal of Non-Crystalline Solids* 219, 89–99. 1997.
- [108] M.F. Ashby. Overview No. 80. *Acta Metallurgica* 37, 5, 1273–1293. 1989.
- [109] M.F. Ashby. Overview No. 92. Materials and shape. *Acta Metallurgica et Materialia* 39, 6, 1025–1039. 1991.
- [110] M.F. Ashby: *Metal foams. A design guide*. Butterworth-Heinemann, Boston. 2000.
- [111] M.F. Ashby: *Materials selection in mechanical design. Das Original mit Übersetzungshilfen*. Easy Reading. Elsevier, Spektrum, Akad. Verl., München, Heidelberg. 2007.
- [112] M.F. Ashby, H. Shercliff, and D. Cebon: *Materials. Engineering, science, processing and design*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London. 2014.
- [113] M.F. Ashby, R.F. Medalist. The mechanical properties of cellular solids. *MTA* 14, 9, 1755–1769. 1983.
- [114] *MatCalc. The Materials Calculator*. MatCalc Engineering, Wien. 2016.
- [115] Materialise: *3-matic*. <http://software.materialise.com/3-matic>. Accessed May 2016.
- [116] Materialise: *Magics*. 2018.
- [117] Metallgießerei Roth GmbH & Co. KG: *Materialdatenblatt EN-AC- $AlSi10Mg(a)$* . *Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften nach DIN EN 1706:1998*. 2010.
- [118] N. Read, W. Wang, K. Essa, M.M. Attallah. Selective laser melting of $AlSi10Mg$ alloy. Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design* 65, 417–424. 2015.
- [119] N.T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, N.M. Everitt. On the formation of $AlSi10Mg$ single tracks and layers in selective laser melting. Microstructure and nano-mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology* 230, 88–98. 2016.
- [120] N.T. Aboulkhair, N.M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck. Reducing porosity in $AlSi10Mg$ parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* 1-4, 77–86. 2014.

- [121] O. Rehme: *Cellular Design for Laser Freeform Fabrication*. Schriftenreihe Lasertechnik 4. Cuvillier Verlag, Göttingen. 2010.
- [122] P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen, C. Magnus. Techniques for joining dissimilar materials: Metals and polymers. *Review on Advanced Materials Science*, 36, 152–164. 2014.
- [123] P. Nemeč, A. Čaja, M. Malcho. Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe. *Mathematical and Computer Modelling* 57, 1-2, 126–136. 2013.
- [124] R. Gradinger. Herausforderungen bei der industriellen Umsetzung des Legierungskonzeptes Scalmalloy für Flugzeuganwendungen. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 154, 9, 403–406. 2009.
- [125] R. Hedayati, M. Sadighi, M. Mohammadi-Aghdam, A.A. Zadpoor. Effect of mass multiple counting on the elastic properties of open-cell regular porous biomaterials. *Materials & Design* 89, 9–20. 2016.
- [126] R. Hedayati, M. Sadighi, M. Mohammadi-Aghdam, A.A. Zadpoor. Mechanical properties of regular porous biomaterials made from truncated cube repeating unit cells. Analytical solutions and computational models. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications* 60, 163–183. 2016.
- [127] R. Hedayati, M. Sadighi, M. Mohammadi-Aghdam, A.A. Zadpoor. Mechanics of additively manufactured porous biomaterials based on the rhombicuboctahedron unit cell. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 53, 272–294. 2016.
- [128] R. Hedayati, M. Sadighi, M. Mohammadi-Aghdam, A.A. Zadpoor. Analytical relationships for the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials based on octahedral unit cells. *Applied Mathematical Modelling* 46, 408–422. 2017.
- [129] R. Hooke. Lectures de potentia restitutiva or of Spring: Explaining the power of springing bodies. Printed for J. Martyn. *Landmarks of Science*. 1678.
- [130] R. Jiang, R. Kleer, F.T. Piller. Predicting the future of additive manufacturing. A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technological Forecasting and Social Change* 117, 84–97. 2017.
- [131] R. Lakes. Materials with structural hierarchy, 511–515. DOI=10.1038/361511a0.
- [132] R. Marek and K. Nitsche: *Praxis der Wärmeübertragung. Grundlagen ; Anwendungen ; Übungsaufgaben*. Carl Hanser Fachbuchverlag. 2011.

- [133] R. McGlen, P. Kew, and D. Reay: *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*. Elsevier Science. 2006.
- [134] R. Poprawe: *Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Springer, Berlin. 2005.
- [135] R. Radonjic, M. Liewald. Approaches for springback reduction when forming ultra high-strength sheet metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 159, 12028. 2016.
- [136] R.K. Gupta, C. Mathew, P. Ramkumar. Strain Hardening in Aerospace Alloys. *Frontiers in Aerospace Engineering* 4, 1, 1–13. 2015.
- [137] S. Esmaeili. Effect of composition on clustering reactions in AlMgSi(Cu) alloys. *Scripta Materialia* 50, 1, 155–158. 2004.
- [138] S. Esmaeili, D.J. Lloyd. Characterization of the evolution of the volume fraction of precipitates in aged AlMgSiCu alloys using DSC technique. *Materials Characterization* 55, 4-5, 307–319. 2005.
- [139] S. Esmaeili, D.J. Lloyd. Modeling of precipitation hardening in pre-aged AlMgSi(Cu) alloys. *Acta Materialia* 53, 20, 5257–5271. 2005.
- [140] S. Esmaeili, D.J. Lloyd, W.J. Poole. A yield strength model for the Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111. *Acta Materialia* 51, 8, 2243–2257. 2003.
- [141] S. Esmaeili, D.J. Lloyd, W.J. Poole. Modeling of precipitation hardening for the naturally aged Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111. *Acta Materialia* 51, 12, 3467–3481. 2003.
- [142] S. Hasse: *Giesserei-Lexikon*. Schiele & Schön, Berlin. 2007.
- [143] S. Klan: *Beitrag zur Evolution von Aluminium-Gusslegierungen für warmfeste Anwendungen*. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg. 2004.
- [144] S.C. Gill, W. Kurz. Rapidly solidified Al-Cu alloys—I. experimental determination of the microstructure selection map. *Acta Metallurgica et Materialia* 41, 12, 3563–3573. 1993.
- [145] S.K. Panigrahi, R. Jayaganthan, V. Pancholi, M. Gupta. A DSC study on the precipitation kinetics of cryorolled Al 6063 alloy. *Materials Chemistry and Physics* 122, 1, 188–193. 2010.
- [146] S.N. Chiu. Aboav-Weaire's and Lewis' laws—A review. *Materials Characterization* 34, 2, 149–165. 1995.
- [147] S.P. Ringer, K. Hono. Microstructural Evolution and Age Hardening in Aluminium Alloys. *Materials Characterization* 44, 1-2, 101–131. 2000.

- [148] S.T. Amancio-Filho, J.F. dos Santos. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures. Recent developments and trends. *Polymer Engineering & Science* 49, 8, 1461–1476. 2009.
- [149] T. M. Nguyen, J. Ku, P. J. Brennan. Fetaures and applications of the groove analysis program (GAP). *The Sixth Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop*, 53–68. 1995.
- [150] T. Masumoto, R. Maddin. The mechanical properties of palladium 20 a/o silicon alloy quenched from the liquid state. *Acta Metallurgica* 19, 7, 725–741. 1971.
- [151] T. Petkov, D. Künstner, T. Pabel, K. Faerber, C. Kneißl, P. Schumacher. Optimierung der Wärmebehandlung einer AlMgSi-Gusslegierung. *Gießerei-Rundschau* 58, 194–200. 2012.
- [152] T. Rayna, L. Striukova. From rapid prototyping to home fabrication. How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change* 102, 214–224. 2016.
- [153] T.L. Panontin, M.R. Hill. The effect of residual stresses on brittle and ductile fracture initiation predicted by micromechanical models. *International Journal of Fracture* 82, 4, 317–333. 1996.
- [154] T.T. Wohlers: *Wohlers report 2014. 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Wohlers Associates, Fort Collins, Col. 2014.
- [155] ThyssenKrupp: *Legierter TK 13CrMo4-5 - warmfester Stahl*.
- [156] ThyssenKrupp: *Präzisionsstahlrohre – nahtlose kaltgezogene Rohre für Hydraulik- und Pneumatik-Druckleitung. Werkstoffdatenblatt*.
- [157] ThyssenKrupp: *Titan Grade 4. Werkstoffdatenblatt*.
- [158] ThyssenKrupp: *TK 1.4404 - Nichtrostender austenitischer Stahl. Werkstoffdatenblatt*.
- [159] ThyssenKrupp: *TK 1.4541 - Nichtrostender austenitischer Stahl. Werkstoffdatenblatt*.
- [160] ThyssenKrupp: *TK 2709 - Kaltarbeitsstahl. Werkstoffdatenblatt*.
- [161] Uddeholm: *Schweißen von Werkzeugstahl. Überall, wo Werkzeuge hergestellt und verwendet werden*.
- [162] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI heat atlas. VDI-Buch*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin. 2010.

- [163] W. Kurz and D.J. Fisher: *Fundamentals of solidification*. Trans Tech Publications, Uetikon-Zuerich, Switzerland, Enfield, N.H. 1998.
- [164] W. Nachtigall and G. Pohl: *Bau-Bionik. Natur - Analogien - Technik*. SpringerLink : Bücher. Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. 2013.
- [165] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, M. Krüger, and H.J. Möhring: *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung*. VCH. 2012.
- [166] X.J. Wang, L.C. Zhang, M.H. Fang, T.B. Sercombe. The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al-12Si alloy. *Materials Science and Engineering: A* 597, 370–375. 2014.
- [167] Y. Aouabdia, A. Boubertakh, S. Hamamda. Precipitation kinetics of the hardening phase in two 6061 aluminium alloys. *Materials Letters* 64, 3, 353–356. 2010.

10 Anhang: A – Rechenbeispiele

10.1 Add. Kapitel 3.1 – Schmelzwärme

Berechnung der Schmelz- und Erwärmungsenergie:

$$q_s \cong 270 \text{ kJ/kg}, \rho_{St} = 7850 \text{ kg/m}^3, V = \frac{2\pi r^3}{3} \cong 0,3 * 10^{-9} \text{ m}^3, c_p \cong 480 \text{ J/kgK}$$

$$Q_{schmelzen} = q_s * \rho * V = 0,636 \text{ J} \quad \text{mit } Q_{schmelzen} = Q_{erwärmen}$$

$$\Delta T = \frac{Q_{schmelzen}}{c_p * \rho * V} = 562,6 \text{ K} \quad T_{warm} = \Delta T + T_0 = 562,6 + 293,15 = 855,75 \text{ K}$$

Berechnung der Erwärmungszeit:

$$v_{scan} = 1100 \text{ mm/s}, d_{focus} = 0,1 \text{ mm}$$

$$t = \frac{d_{focus}}{v_{scan}} \cong 91 * 10^{-6} \text{ s}$$

10.2 Add. Kapitel 3.2.1 – Fertigungstechnologie- restriktionen

Berechnung der Kühlrate für X3NiCoMoTi 18-9-5 und AlSi10Mg:

$$\text{Nach Gl. 3.1: } \frac{dT}{dt} = \frac{|\Delta T| \lambda}{\rho c_p d^2} \left[\frac{\text{K}}{\text{s}} \right].$$

	Zeichen	Einheit	X3NiCoMoTi 18-9-5	AlSi10Mg
Wärmeleitfähigkeit	λ	$\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$	14	100
spez. Wärmekapazität	c_p	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$	460	920
Dichte	ρ	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	8200	2670
Temperaturintervall	ΔT	[K]	1400	560
Kühlrate	\dot{T}	$\left[\frac{\text{K}}{\text{s}} \right]$	$\sim 3 * 10^6$	$\sim 1,4 * 10^7$

10.3 Add. Kapitel 3.2.2 - Leichtbau durch Werkstoffe

Exemplarische Beispiele für die Auswirkung unterschiedlicher Werkstoffe auf das mechanische Verhalten unter gleichen (idealisierten) Bedingungen.

Geg.: $F_{Zug} = 1000N$

Bezeichnung	Zugfestigkeit R_m [MPa]	min. Querschnitt $A_{min.}$ [mm ²]	Leichtbaufaktor (norm. auf Al)
Aluminium 99,5	60	16,6	1x
St52	470	2,2	7,5x
X3NiCoMoTi18-9-5	1100	0,9	18,4x

10.4 Add. Kapitel 3.2.3 - Materialeffizienz

Der soliden Aluminiumkonstruktion soll ein äquivalentes Bauteil aus Aluminiumschaum mit einer relativen Dichte von $\rho^* = 0,3$ gegenübergestellt werden.

Geg.: $\rho_{Aluminium} = 2,7$ [Mg/m³]

$$\rho_{Schaum} = \rho_{Aluminium} * \rho^* = 0,81 \left[\frac{Mg}{m^3} \right] \quad \text{Gl. 10.1}$$

Daraus ergibt sich nach Gl. 3.5

$$\xi_{Aluminium} = \frac{\sqrt{E}}{\rho} = \frac{\sqrt{70}}{2,7} = 3,09 \left[\frac{\sqrt{GPa}}{Mgm^{-3}} \right] \quad \text{Gl. 10.2}$$

Im Vergleich dazu die Materialeffizienz von Aluminiumschaum:

$$\xi_{Schaum} = \frac{\sqrt{E}}{\rho} = \frac{\sqrt{70}}{0,81} = 10,33 \left[\frac{\sqrt{GPa}}{Mgm^{-3}} \right] \quad \text{Gl. 10.3}$$

11 Anhang: B – Basisprogramm

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%/ GUI definition /
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function varargout = LPcalc(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @LPcalc_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @LPcalc_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
path(path,'Scripts')
path(path,'calc')
function LPcalc_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
initialize_gui(hObject, handles, false);
function varargout = LPcalc_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%/ GUI Initialisierung /
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function initialize_gui(fig_handle, handles, isreset)

if isfield(handles, 'inputdata') && ~isreset
    return;
end
theta=0;
cell_vol=0;
cell_dimension_x=0;
cell_dimension_y=0;
cell_dimension_z=0;
cell_elen=0;
cell_earea=0;
cell_young=0;
cell_s_pl=0;

handles.inputdata.diameter = 0;
handles.inputdata.length = 0;
handles.inputdata.solid_density = 0;
handles.inputdata.young_input = 0;
handles.inputdata.input_yield_strength=0;
handles.inputdata.input_poisson=0;
handles.inputdata.rel_density = 0;
handles.inputdata.material = 'Material Type';
handles.inputdata.ctype = 'Cell Type';
handles.inputdata.rel_dense_gccm = 0;

handles.inputdata.lat_name = 'lattice.stl';
handles.inputdata.mesh_name = 'mesh.bdf';
handles.inputdata.no_ucecell_x = 1;
handles.inputdata.no_ucecell_y = 1;
handles.inputdata.no_ucecell_z = 1;
handles.inputdata.surf_quality = 9;
handles.inputdata.ctype_sw= 'rhomb_dod';
handles.inputdata.version_id= 'V0.1';
handles.inputdata.ctype_E_k=0;
handles.inputdata.ctype_E_p=0;
handles.inputdata.ctype_Spl_k=0;
handles.inputdata.ctype_Spl_p=0;
handles.inputdata.cell_young =0;

set(handles.diameter, 'String', handles.inputdata.diameter);
set(handles.length, 'String', handles.inputdata.length);
set(handles.solid_density, 'String', handles.inputdata.solid_density);
```

```

set(handles.young_input, 'String', handles.inputdata.young_input);
set(handles.input_yield_strength, 'String', handles.inputdata.input_yield_strength);
set(handles.input_nu, 'String', handles.inputdata.input_poisson);
set(handles.mat_input, 'String', handles.inputdata.material);
set(handles.ctype_input, 'String', handles.inputdata.ctype);
set(handles.rel_dense_result, 'String', handles.inputdata.rel_density);
set(handles.rel_dense_gccm, 'String', handles.inputdata.rel_dense_gccm);
%set(handles.angle_out, 'String', theta);
set(handles.ucell_vol_out, 'String', cell_vol);
set(handles.celldim_x, 'String', cell_dimension_x);
set(handles.celldim_y, 'String', cell_dimension_y);
set(handles.celldim_z, 'String', cell_dimension_z);
set(handles.edge_length, 'String', cell_ellength);
%set(handles.effective_area, 'String', cell_earea);
set(handles.young_xx, 'String', cell_young);
set(handles.young_yy, 'String', cell_young);
set(handles.young_zz, 'String', cell_young);
set(handles.lattice_stl_name, 'String', handles.inputdata.lat_name);
set(handles.lattice_mesh_name, 'String', handles.inputdata.mesh_name);
set(handles.no_ucell_x, 'String', handles.inputdata.no_ucell_x);
set(handles.no_ucell_y, 'String', handles.inputdata.no_ucell_y);
set(handles.no_ucell_z, 'String', handles.inputdata.no_ucell_z);
%set(handles.surf_qual, 'String', handles.inputdata.surf_quality);
set(handles.version_id, 'String', handles.inputdata.version_id);
% set(handles.output_parameter_E_k, 'String', handles.inputdata.ctype_E_k);
% set(handles.output_parameter_E_p, 'String', handles.inputdata.ctype_E_p);
% set(handles.output_parameter_S_k, 'String', handles.inputdata.ctype_Spl_k);
% set(handles.output_parameter_S_p, 'String', handles.inputdata.ctype_Spl_p);
set(handles.output_s_pl, 'String', cell_s_pl);
guidata(handles.figure1, handles);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%/ GUI reset /
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function reset_Callback(hObject, eventdata, handles)
initialize_gui(gcf, handles, true);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%/ Parameter Input /
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%strut diameter input
function diameter_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function diameter_Callback(hObject, eventdata, handles)

diameter = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(diameter)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
% Save the new diameter value
handles.inputdata.diameter = diameter;
guidata(hObject,handles)

%Strut length input
function length_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function length_Callback(hObject, eventdata, handles)

length = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(length)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.inputdata.length = length;
guidata(hObject,handles)

%Material (Text) input
function mat_input_Callback(hObject, handles)
material=get(hObject, 'String');
handles.inputdata.material = material;
guidata(hObject,handles)
function mat_input_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Cell type (Text) input
function ctype_input_Callback(hObject, eventdata, handles)
ctype=get(hObject, 'String');
handles.inputdata.ctype = ctype;
guidata(hObject,handles)
```

```
function ctype_input_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Solid density input
function solid_density_Callback(hObject, eventdata, handles)
solid_density = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(solid_density)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
% Save the new density value of the solid material
handles.inputdata.solid_density = solid_density;
guidata(hObject,handles)
function solid_density_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Solid Young's modulus input
function young_input_Callback(hObject, eventdata, handles)
young_input = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(young_input)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
% Save the new Young value of the solid material
handles.inputdata.young_input = young_input;
guidata(hObject,handles)
function young_input_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Solid yield strength input
function input_yield_strength_Callback(hObject, eventdata, handles)
input_yield_strength = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(input_yield_strength)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
% Save the new YS of the solid material
handles.inputdata.input_yield_strength = input_yield_strength;
guidata(hObject,handles)
```

```
function input_yield_strength_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Input Poisson Ratio
function input_nu_Callback(hObject, eventdata, handles)
input_poisson = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(input_poisson)
    set(hObject, 'String', 0);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
% Save the new Poisson ratio of the solid material
handles.inputdata.input_poisson = input_poisson;
guidata(hObject,handles)
function input_nu_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Lattice STL-Filename for export
function lattice_stl_name_Callback(hObject, eventdata, handles)
lat_name=get(hObject, 'String');
handles.inputdata.lat_name = lat_name;
guidata(hObject,handles)
function lattice_stl_name_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Lattice mesh name for export
function lattice_mesh_name_Callback(hObject, eventdata, handles)
mesh_name=get(hObject, 'String');
handles.inputdata.mesh_name = mesh_name;
guidata(hObject,handles)
function lattice_mesh_name_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Number of unit cells in x direction
function no_ucell_x_Callback(hObject, eventdata, handles)
ucell_x = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(ucell_x)
```

```

    set(hObject, 'String', 1);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.inputdata.no_ucell_x = ucell_x;
guidata(hObject,handles)
function no_ucell_x_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Number of unit cells in y direction
function no_ucell_y_Callback(hObject, eventdata, handles)
ucell_y = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(ucell_y)
    set(hObject, 'String', 1);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.inputdata.no_ucell_y = ucell_y;
guidata(hObject,handles)
function no_ucell_y_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Number of unit cells in z direction
function no_ucell_z_Callback(hObject, eventdata, handles)
ucell_z = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(ucell_z)
    set(hObject, 'String', 1);
    errordlg('Input must be a number','Error');
end
handles.inputdata.no_ucell_z = ucell_z;
guidata(hObject,handles)
function no_ucell_z_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%Inputvalue for surface quality (rendering for FEM)
% function surf_qual_Callback(hObject, eventdata, handles)
% surf_quality = str2double(get(hObject, 'String'));
% if isnan(surf_quality)
%     set(hObject, 'String', 9);
%     errordlg('Input must be a number','Error');
% end

```

```
% handles.inputdata.surf_quality = surf_quality;
% guidata(hObject,handles)
% function surf_qual_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
%     set(hObject,'BackgroundColor','white');
% end

%Switch for available cell types
function celltype_Callback(hObject, eventdata, handles)

str = get(hObject, 'String');
val = get(hObject, 'Value');

switch str{val};
    case 'rhomboedric dodecahedral'
        lattice.ctype = 'rhomb_dod';
        lattice.E_k = 0.145;
        lattice.E_p = 0.9885;
        lattice.Spl_k = 2.3289;
        lattice.Spl_p = 1.5612;
    case 'BCC'
        lattice.ctype = 'bcc';
        lattice.E_k = 0;
        lattice.E_p = 0;
        lattice.Spl_k = 0;
        lattice.Spl_p = 0;
    case 'cube'
        lattice.ctype = 'cube';
        lattice.E_k = 0;
        lattice.E_p = 0;
        lattice.Spl_k = 0;
        lattice.Spl_p = 0;
    case 'rhomboicuboctahedral'
        lattice.ctype = 'rhomb_cub_oct';
        lattice.E_k = 0;
        lattice.E_p = 0;
        lattice.Spl_k = 0;
        lattice.Spl_p = 0;
    case 'truncated cube'
        lattice.ctype = 'trunc_cube';
        lattice.E_k = 0;
        lattice.E_p = 0;
        lattice.Spl_k = 0;
        lattice.Spl_p = 0;
```

```

end
% Save the handles structure.
handles.inputdata.ctype_sw=lattice.ctype;
handles.inputdata.ctype_E_k=lattice.E_k;
handles.inputdata.ctype_E_p=lattice.E_p;
handles.inputdata.ctype_Spl_k=lattice.Spl_k;
handles.inputdata.ctype_Spl_p=lattice.Spl_p;
guidata(hObject,handles)
function celltype_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%/ GUI menu and shortcuts /
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function File_menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
function calc_menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
function lattice_gen_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Function for lattice calculation
function calc_Callback(hObject, eventdata, handles)

%calculation of uc-rel. density
rel_density = rel_dense( handles.inputdata.diameter, handles.inputdata.length, handles.inputdata.ctype_sw );
handles.inputdata.rel_dense_result = rel_density;
set(handles.rel_dense_result, 'String', rel_density*100)

rel_dense_gccm = rdenstogccm (handles.inputdata.rel_dense_result, handles.inputdata.solid_density);
handles.inputdata.rel_dense_gccm = rel_dense_gccm;
set(handles.rel_dense_gccm, 'String', rel_dense_gccm);

%calculation of lattice angle
theta=tetra_angle();
theta_deg=acos(-1/3)/2;
handles.inputdata.theta = theta;
%set(handles.angle_out, 'String', theta);

%calculation of uc-volume
cell_vol=cell_volume(handles.inputdata.length,handles.inputdata.ctype_sw);
handles.inputdata.cell_vol = cell_vol;
set(handles.ucell_vol_out, 'String', cell_vol);

%calculation of uc-dimension

```

```

[cell_dimension_x,cell_dimension_y,cell_dimension_z]=cell_dim(handles.inputdata.length, theta_deg,
handles.inputdata.ctype_sw);
handles.inputdata.cell_dimension_x = cell_dimension_x;
handles.inputdata.cell_dimension_y = cell_dimension_y;
handles.inputdata.cell_dimension_z = cell_dimension_z;
set(handles.celldim_x, 'String', cell_dimension_x);
set(handles.celldim_y, 'String', cell_dimension_y);
set(handles.celldim_z, 'String', cell_dimension_z);

%calculation of uc-edge length
cell_length=edge_length(handles.inputdata.length,handles.inputdata.ctype_sw);
handles.inputdata.cell_length = cell_length;
set(handles.edge_length, 'String', cell_length);

%effective cross section calculation
cell_earea=cross_section(theta_deg,handles.inputdata.diameter);
handles.inputdata.cell_earea = cell_earea;
%set(handles.effective_area, 'String', cell_earea);

%calculation young's modulus
cell_young=lattice_young(handles.inputdata.rel_dense_result, handles.inputdata.young_input,
handles.inputdata.ctype_E_k, handles.inputdata.ctype_E_p, handles.inputdata.ctype_sw,
handles.inputdata.diameter, handles.inputdata.length, handles.inputdata.input_poisson );
handles.inputdata.cell_young = cell_young;
set(handles.young_xx, 'String', cell_young);
set(handles.young_yy, 'String', cell_young);
set(handles.young_zz, 'String', cell_young);

%calculation plateau strength
cell_s_pl=lattice_spl(handles.inputdata.rel_dense_result, handles.inputdata.input_yield_strength,
handles.inputdata.ctype_Spl_k, handles.inputdata.ctype_Spl_p,handles.inputdata.diameter,
handles.inputdata.length, handles.inputdata.ctype_sw );
handles.inputdata.output_yield_strength = cell_s_pl;
set(handles.output_s_pl, 'String', cell_s_pl);

%Plot relative Young and Stress
axes(handles.axes1);
hold on
cla reset
l=handles.inputdata.length;
d=handles.inputdata.diameter;
n=10000;
xd=0.001;
fx=zeros(1,n);
fey=zeros(1,n);

```

```
fsy=zeros(1,n);

for k=1:n

[rel_density,rel_stress,rel_young] =
plotcalc_rel(handles.inputdata.ctype_E_k,handles.inputdata.ctype_E_p,handles.inputdata.ctype_Spl_k,handles.in
putdata.ctype_Spl_p,handles.inputdata.ctype_sw, xd , handles.inputdata.input_poisson,
handles.inputdata.input_yield_strength);

fx(k)=rel_density;
fey(k)=rel_young;
fsy(k)=rel_stress;

if rel_density<0.48
    k=k+1;
    xd=xd+0.001;
else
    k=n;
end
end

yyaxis left
xlabel('relative density [-]')
plot(fx,fey);

yyaxis right
plot(fx,fsy);
legend('Location','northwest')
legend('relative modulus [-]','relative stress [-]')
hold off
ax = gca;
ax.XGrid = 'on';
ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

guidata(hObject,handles)

%Save calculated values
function saveastxt_Callback(hObject, eventdata, handles)
a=handles.inputdata.material;
b=handles.inputdata.ctype;
c=num2str(handles.inputdata.solid_density);
d=num2str(handles.inputdata.young_input);
e=num2str(handles.inputdata.diameter);
```

```

f=num2str(handles.inputdata.length);
g=num2str(handles.inputdata.cell_young);
no={'Material'; 'Cell Type'; 'Solid Density'; 'Solid Youngs Modulus' ; 'Strut Diameter' ; 'Strut Length' ;'Cellular
Youngs Modulus'};
value={ a ; b ; c ; d ; e ; f ; g};
unit={ '' ; '' ; 'g/ccm' ; 'MPa' ; 'mm' ; 'mm' ; 'MPa'};
A=table(value,unit, 'RowNames', no);
writetable(A, 'Lattice Parameter Table.txt','Delimiter','\t', 'WriteRowNames', true)

%Lattice STL generation – basis script lattice_generator.m used
function lat_gen_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Configuration variables:

%Strut length
lattice.slength=handles.inputdata.length;

%strut diameter
lattice.sdiameter=handles.inputdata.diameter;

%No. Cells x direction:
lattice.nx=handles.inputdata.no_ucell_x;

%No. Cells y direction:
lattice.ny=handles.inputdata.no_ucell_y;

%No. cells z direction:
lattice.nz=handles.inputdata.no_ucell_z;

lattice.csize.x=handles.inputdata.cell_dimension_x; %Cell size x
lattice.csize.y=handles.inputdata.cell_dimension_y; %Cell size y
lattice.csize.z=handles.inputdata.cell_dimension_z; %Cell size z

%Global Parameters:
lattice.ctype=handles.inputdata.ctype_sw;
% Cell ctype - Valid types:
% rhomb_dod - extended rhomboedric dodecahedra
% BCC - regular Body centred cubic
% Cube
% rhombicuboctahedral
% truncated cube

d=handles.inputdata.diameter;

lattice.element_radius=d/2;
lattice.divisions=handles.inputdata.surf_quality;

```

```

lattice.origin=[0,0,0];      % Lattice origin. lattice will be created in the positive direction from this point
lattice.uniform=0; % logic selection - run uniform creation option for higher efficiency in large lattices

misc.filename=handles.inputdata.lat_name;      % STL filename - use .stl extension
misc.name=handles.inputdata.lat_name;         % Name of STL part, as included in STL header line
misc.stl_binary=1;                            % Produce STL in binary? Logic value
misc.error_check=0;                          % Check Facets for errors? Logic value
misc.run_stl=1;                               % Logical value, create STL?
misc.run_nastran=1;                          % Logical value, create FE mesh?
misc.ebound=0.000001;                        % Error bound term for numerical error

% NASTRAN config params:
FEvars.nas_filename=handles.inputdata.mesh_name; % Name of file to write FE mesh to
FEvars.PID1=1;      % Property ID for beam cards
FEvars.MID1=23;     % Material ID for property and material cards
% End of configuration variables.
varout=Lattice_cell(lattice,FEvars,misc, handles.inputdata.input_poisson, handles.inputdata.young_input,
handles.inputdata.solid_density); % launch main script

fclose all;
[vertices,faces,normals,name] = stlRead(handles.inputdata.lat_name);
stlPlot(vertices,faces,name)

%Printig PDF file by shortcut
function save_pdf_Callback(hObject, eventdata, handles)
% PDF title page generation - need gs64c9.19! - script gui2pdf.m used
obj = gui2pdf( 'LPcalc Summary', handles.inputdata.version_id);
obj.addTxtProperty ( 'topLeft', 'color', 'black' );
obj.addTxtProperty ( 'topLeft', 'FontSize', 12 );
obj.addBlankPage();
obj.addTextToPage ( 'LPcalc', -1, [0.25 0.6], 'color', 'black', 'FontSize', 64 );
obj.addTextToPage ( 'Report', -1, [0.25 0.5], 'color', 'black', 'FontSize', 32 );
obj.addTextToPage ( 'User specific calculation results', -1, [0.05 0.05], 'color', 'black', 'interpreter', 'tex' );
obj.openPDF = false;
obj.progressBar = true;
obj.writePDF();

% Print Table Script - need Miktex Latex2pdf! - script PrintTable.m used
t = PrintTable();
t.HasRowHeader = true;
t.HasHeader = true;
t.addRow('Dept. Product Engineering', 'MU Leoben', date);
t.addRow('LPCalc',handles.inputdata.version_id,'');
t.addRow('','');
t.addRow('Material',handles.inputdata.material,'');

```

```

t.addRow('Cell Type',handles.inputdata.ctype, '');
t.addRow('Solid Density', handles.inputdata.solid_density, 'g/ccm');
t.addRow('Solid Youngs Modulus', handles.inputdata.young_input, 'MPa');
t.addRow('Strut Diameter', handles.inputdata.diameter, 'mm');
t.addRow('Strut Length', handles.inputdata.length, 'mm');
t.addRow('Relative Density', handles.inputdata.rel_dense_result, 'pct. ');
t.addRow('Relative Density', handles.inputdata.rel_dense_gccm, 'g/ccm');
t.addRow('Cellular Youngs Modulus XX', handles.inputdata.cell_young, 'MPa');
t.addRow('Cellular Youngs Modulus YY', handles.inputdata.cell_young, 'MPa');
t.addRow('Cellular Youngs Modulus ZZ', handles.inputdata.cell_young, 'MPa');
t.addRow('Cell Dimension x-direction', handles.inputdata.cell_dimension_x, 'mm');
t.addRow('Cell Dimension y-direction', handles.inputdata.cell_dimension_y, 'mm');
t.addRow('Cell Dimension z-direction', handles.inputdata.cell_dimension_z, 'mm');
t.addRow('Cell Edge Length',handles.inputdata.cell_length, 'mm');
%t.addRow('Effective Cross Section', handles.inputdata.cell_earea, 'sqmm');
t.addRow('Unit Cell Volume', handles.inputdata.cell_vol, 'cmm');
t.TightPDF = false;
t.saveToFile('table.pdf');

%append PDF files to Report File - script append_pdfs() used
append_pdfs('LPcalc_report.pdf', 'title.pdf', 'table.pdf')
delete('title.pdf');
delete('table.pdf');

%Exit by shortcut
function exit_Callback(hObject, eventdata, handles)
close all; clear all; fclose all;

%Perform calculation by button
function calc_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
guidata(hObject,handles)
LPcalc('calc_Callback',hObject,eventdata,guidata(hObject));
function calc_btn_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

%Reset by button
function reset_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
LPcalc('reset_Callback',hObject,eventdata,guidata(hObject));
function reset_btn_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

%Exit by button
function exit_btn_Callback(hObject, eventdata, handles)
LPcalc('exit_Callback',hObject,eventdata,guidata(hObject));

```

12 Anhang: C – Subroutinen

```

function [rel_density,rel_stress,rel_young] = plotcalc_rel(E_k,E_p,S_k,S_p,ctype,d,
nu_solid, young_solid)
l=10;
if strcmpi(ctype,'rhomb_dod') % rhomboedric dodecahedral cell
    rel_density=1.52* (d/l).^2;
    rel_young=E_k*rel_density.^E_p;
    rel_stress=S_k*rel_density.^S_p;
elseif strcmpi(ctype,'BCC') % body centred
    rel_density=4.*pi.*sqrt(3).*(d./(2.*l)).*(d./(2.*l));
    rel_young=(4.*sqrt(3))./((1.^2./(pi.*(d/2).^2)+(1.^4/(2.*pi.*(d/2).^4)));
    rel_stress=32*sqrt(2)*((d/(2*l)).^3)/3;
elseif strcmpi(ctype,'cube') % cube cell
    rel_density=(3*pi*(d/(2*l)).^2)-(8*sqrt(2)*((d/(2*l)).^3));
    rel_young=pi*((d/(2*l)).^2);
    rel_stress=pi*((d/(2*l)).^2);
elseif strcmpi(ctype,'rhomb_cub_oct') % rhombicuboctahedral cell
    rel_density=((36*pi*(d/(2*l))*d/(2*l))/(7+sqrt(5)))-
((12*12.0404*(d/(2*l))^3)/(7+sqrt(5)));
    G_solid=(1/(2*(1+nu_solid)))*young_solid;
a=4+(108*(d/(2*l)).^2)+(207*(d/(2*l)).^4)+(81*(d/(2*l)).^6)+((G_solid/young_solid)*
((2/3)+(19*(d/(2*l)).^2)+(45*(d/(2*l)).^4)+(18*(d/(2*l)).^6)));
b=8+(70*(d/(2*l)).^2)+(105*(d/(2*l)).^4)+(27*(d/(2*l)).^6)+((G_solid/young_solid)*
(4/3)+(13*(d/(2*l)).^2)+(23*(d/(2*l)).^4)+(6*(d/(2*l)).^6)));
    c_1=a/b;
    rel_young=((4*pi*(d/(2*l))^2)/(3*(1+sqrt(2))))*(c_1);
    rel_stress=(4*pi*((d/(2*l))^2))/((sqrt(2)+1)^2);
elseif strcmpi(ctype,'trunc_cube') % truncated cube cell
    rel_density=(15*pi*((d/(2*l)).^2))/((1+sqrt(2)).^3);

rel_young=((2*pi*(d/(2*l)).^2)/(sqrt(2)+1))*((1+(9*(d/(2*l)).^2))/(5+(21*(d/(2*l)
)).^2)));
    rel_stress=(pi*((d/(2*l)).^2))/((sqrt(2)+1).^2);
end
function [ cell_vol ] = cell_volume( l, ctype )
if strcmpi(ctype,'rhomb_dod') % rhomboedric dodecahedral cell
    cell_vol=3.67*1^3;
elseif strcmpi(ctype,'BCC') % body centred
    cell_vol=((2*l)/sqrt(3))^3;
elseif strcmpi(ctype,'cube') % cube cell
    cell_vol=1^3;
elseif strcmpi(ctype,'rhomb_cub_oct') % rhombicuboctahedral cell
    cell_vol=((12+(10*sqrt(2)))/3)*1^3;
elseif strcmpi(ctype,'trunc_cube') % truncated cube cell
    cell_vol=((21+(14*sqrt(2)))/3)*1^3;
end

```