
Entwicklung einer ganzheitlichen Verfahrenssystematik bei der Qualifizierung neuer Werkstoffe für das Laser-Sintern am Beispiel Polypropylen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Thomas Reinhardt

aus

Mülheim an der Ruhr

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt
Prof. Dr.-Ing. Peter Köhler

Tag der mündlichen Prüfung: 30.05.2016

KURZBESCHREIBUNG DER ARBEIT

Dem Laser-Sintern von Kunststoffen wird als additives Fertigungsverfahren auf Grund seiner guten Materialeigenschaften sowie der Einhaltung der geometrischen Produkteigenschaften hohes Potential bei der Serienproduktion zugesprochen. Allerdings wird dieser Trend zum Rapid Manufacturing derzeit unter anderem durch die mangelnde Bauteilreproduzierbarkeit und die eingeschränkt nutzbaren Werkstoffe limitiert.

Ausgehend von dem Bedarf, die Materialpalette im Laser-Sinterbereich an die Marktbedürfnisse anzupassen, wird das Werkstoffspektrum durch die prozesseitige Qualifizierung und Optimierung um den Werkstoff Polypropylen erweitert. Darüber hinaus wird das typisch transversal isotrope Werkstoffverhalten zur zukünftigen Vorhersage der mechanischen Bauteileigenschaften durch ein Materialmodell mittels Finite-Elemente-Methode abgebildet. Durch die Konzipierung und programmtechnische Umsetzung einer neuen Belichtungsstrategie sowie die Findung und Evaluierung nachgelagerter Prozesse zur Nachbehandlung lasergesinteter Bauteile werden definierte Qualitätsmerkmale wie die geometrischen Produktspezifikationen zielgerichtet optimiert.

SHORT SUMMARY

Within the additive manufacturing technologies, the laser-sintering process offers both exceptionally good material and geometrical product properties, and is therefore considered for series production. However, from the present point of view this trend towards rapid manufacturing is limited, among other things, by the lacking product replicability and the restricted usability of materials.

Based on the requirement to be adjusted to general market conditions, the range of materials of laser-sintering processes is enhanced by the material polypropylene. In order to process the material, statistical planning of experiments is used to qualify and optimize part properties. In addition, the transversal isotropic material behavior of laser-sintered parts is modeled with the finite element method (FEM) to predict the mechanical properties. Subsequent experiments will deal with the optimization of defined quality characteristics. In detail, a new exposure strategy is being conceived and implemented. Furthermore follow-up treatments are found and evaluated to improve laser-sintered surface quality.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzbeschreibung der Arbeit	II
Abkürzungen und Symbole	VI
Abbildungen und Tabellen	IX
1 Einleitung	1
2 Verfahrensgrundlagen	3
2.1 Einordnung und Systematik der additiven Fertigungsverfahren	3
2.2 Werkstoffe für das Laser-Sintern	4
2.3 Funktionsprinzip und Verfahrensablauf des Laser-Sinterns	6
2.4 Modellaufbereitung	7
2.4.1 Beschreibung der Modelloberfläche / Triangulation.....	7
2.4.2 Bauteilpositionierung und -orientierung	10
2.4.3 Schichtdatengenerierung	11
2.4.4 Erzeugung der Belichtungsbahnen und Parametervergabe	17
2.5 Bauphase	18
2.5.1 Vorbereitung / Vorheizphase.....	18
2.5.2 Sinterprozess.....	18
2.5.3 Abkühlphase	22
2.6 Nachbearbeitung lasergesinterter Bauteile	23
2.6.1 Notwendige Nachbearbeitungsschritte.....	23
2.6.2 Optionale Nachbearbeitungsverfahren.....	23
2.7 Qualitätssicherung lasergesinterter Bauteile	26
2.7.1 Präventive Prozess- und Bauteilstrukturmodellierung durch die Finite- Elemente-Methode.....	27
2.7.2 Ergebnisorientierte Sicherung der Bauteileigenschaften	29
3 Zusammenfassende Bewertung und Zielsetzung	32
4 Versuchseinrichtung und Vorgehensweise	35
4.1 Bauteilfertigung.....	35
4.1.1 Anlagentechnik	35
4.1.2 Ausgangsmaterial	36
4.1.3 Orientierung und Positionierung der Probenkörper	36
4.1.4 Verarbeitung und Aufbereitung der Proben.....	37

4.2	Bestimmung der Bauteileigenschaften.....	37
4.2.1	Erfassung der geometrischen Produktspezifikationen.....	38
4.2.2	Erfassung der werkstoffmechanischen Eigenschaften	43
4.2.3	Weitere Bauteileigenschaften	46
4.3	Überblick über die statistische Versuchsplanung und deren Einsatzfähigkeit	47
4.3.1	Screening	48
4.3.2	Optimierung	49
4.4	Vorgehensweise bei der Auswertung.....	49
4.4.1	Wirkungsanalyse.....	50
4.4.2	Varianzanalyse	51
4.4.3	Regressionsanalyse.....	52
4.5	Kontrollverfahren / Bewertung der Ergebnisse.....	52
5	Qualifizierung der Prozessparameterführung lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen.....	54
5.1	Ausgangsmaterial Polypropylen.....	54
5.2	Verarbeitungsgrenzen des Werkstoffes Polypropylen auf dem Anlagensystem Formiga P 100.....	61
5.3	Eingrenzung und Verifizierung der Haupteinflussgrößen	63
5.3.1	Mechanische Eigenschaften	65
5.3.2	Oberflächengüte	67
5.3.3	Form- und Maßhaltigkeit	69
5.3.4	Fazit.....	70
5.4	Modellgestützte Optimierung	72
5.4.1	Mechanische Eigenschaften	73
5.4.2	Einfluss auf Oberflächengüte	78
5.4.3	Einfluss auf Form- und Maßhaltigkeit.....	81
5.5	Optimiertes Prozessparameterfenster für Polypropylen	84
6	Abbildung des Materialverhaltens lasergesinterter Bauteile mittels FEM-Analyse.....	86
6.1	Anisotropie der mechanischen Materialeigenschaften	86
6.2	Grundlegender Aufbau einer FEM-Simulation.....	87
6.3	Das Materialmodell	89
6.3.1	Genereller Aufbau des Materialmodells	89
6.3.2	Beschreibung des mechanischen Lastzustands.....	90
6.3.3	Beschreibung elastomechanischer Probleme	91
6.3.4	Beachtung der richtungsabhängigen Materialeigenschaften	92
6.4	Modellierung des uniaxialen Zugversuches	96
6.4.1	Preprozess.....	96
6.4.2	Postprozess	99

7	Alternative Belichtungsstrategien durch selektive Flächenbelichtung	103
7.1	Orientierungsabhängigkeit lasergesinterter Bauteile	103
7.1.1	Nach unten gerichtete Bauteiloberflächen.....	104
7.1.2	Nach oben gerichtete Bauteiloberflächen.....	105
7.2	Konzept und Realisierung der selektiven Flächenbelichtung	107
7.2.1	Architektur.....	107
7.2.2	Datenaufbereitung / Flächendetektierung und -zuweisung.....	108
7.2.3	Automatisierte Generierung von Scanpfaden.....	110
7.2.4	Orientierungsabhängige Parameterzuweisung.....	112
7.3	Validierung der selektiven Belichtungsstrategie	113
8	Nachbearbeitung lasergesinterter Bauteile	115
8.1	Eingrenzung potentieller Nachbearbeitungsverfahren.....	116
8.2	Mechanische Nachbearbeitung durch das Strahlen mit Feststoffen.....	120
8.3	Mechanische Nachbearbeitung durch das Fliehkraftgleitschleifen	122
8.4	Chemische Nachbearbeitung durch das Tauchätzen.....	124
8.4.1	Eingrenzung potentieller Wirkmedien.....	125
8.4.2	Einfluss auf die geometrischen Produktspezifikationen	128
8.4.3	Einfluss auf die werkstoffmechanischen Eigenschaften	135
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	136
10	Literaturverzeichnis.....	139

ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

Nomenklatur

a_{ij}	-	Transformationsmatrix
C	[mm]	Spitzenhöhe
CCD	-	Central composite design
CCRD	-	Central composite rotatable design
D_a	[mm]	Maximale Abweichung der Spitzenhöhe
D_s	[mm]	Schichtstärke
DSC	-	Dynamische Differenzkalorimetrie
E_1	-	Bauebene
E_2	-	Ebene einer Dreiecksfacette
FWE	-	Faktor-Wechselwirkungseffekt
GPS	-	Geometrische Produktspezifikationen
H_R	-	Hausner-Zahl
HE	-	Haupteffekt
K	-	Schnittkante
MFR	[g/10min]	Schmelze-Massefließrate
MVR	[cm ³ /10min]	Schmelze-Volumenfließrate
PA	-	Polyamid
PKG_01	-	Prüfkörpergeometrie 01 zur Erfassung definierter Formelemente
PKG_02	-	Prüfkörpergeometrie 02 zur Erfassung von Form- und Maßhaltigkeit
PKG_03	-	Schulterzugstab nach DIN EN ISO 3167
PKG_04	-	Prüfkörpergeometrie zur Erfassung des Schubmoduls
PKG_05	-	Prüfkörpergeometrie zur Erfassung der Bauteildichte
PP	-	Polypropylen
t_{GS}	[s]	Bearbeitungszeit Gleitschleifen
α	[°]	Schnittwinkel zwischen Bauebene und Dreiecksfacette
α_{BO}	[°]	Bauteilorientierung
α_{SW}	[°]	Spitzenwinkel
ζ_{SP}	[mm]	Sehnenlänge
$P_k^{(i)}$	-	Dreiecksordinate k (k = 1 ... 3) der Facette i
$\vec{n}^{(i)}$	-	Normalenvektor der Facette i
\vec{n}_E	-	Normalenvektor zur Bauebene
\vec{n}_2	-	Normalenvektor einer Dreiecksfacette
Z_i	-	Aktuelle Schichthöhe

Prozesskennwerte

E_A	[J/cm ²]	Flächenenergiedichte
E_S	[J/cm]	Streckenenergiedichte
E_V	[J/cm ³]	Volumenenergiedichte

h	$[mm]$	Strahlverschiebung (Kontur)
$P_{\text{Fläche}}$	$[J/s]$	Laserleistung (Füllbereich)
P_{Kontur}	$[J/s]$	Laserleistung (Kontur)
$v_{\text{Fläche}}$	$[mm/s]$	Lasergeschwindigkeit (Füllbereich)
v_{Kontur}	$[mm/s]$	Lasergeschwindigkeit (Kontur)
Δs	$[mm]$	Spurabstand (Füllbereich)
λ_{Laser}	$[\mu m]$	Wellenlänge des CO ₂ -Laser

Statistische Kenngrößen

e_1	-	Fehler von Merkmalskombination zu Merkmalskombination
f_x	$[-]$	Anzahl der Freiheitsgrade des Faktors x
L	-	Anzahl der Faktoren
n	-	Anzahl der Experimente
$L_n(S^P)$	-	Kurzzeichen für ein orthogonales Feld
P	-	Anzahl der Zuordnungen
p_x	$[\%]$	Prozentuale Bedeutung des Faktors x
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
R^2_{adj}	-	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
R^2_{pred}	-	Vorhersehendes Bestimmtheitsmaß
S	-	Anzahl der Faktorstufen
S/N	$[-dB]$	Signal-Rausch-Verhältnis
SQ'_x	-	Streuungsanteil zwischen den Messgrößen des Faktors x
SQ_{Gesamt}	$[dB^2]$	Totale Fehlerquadratsumme
SQ_x	$[dB^2]$	Summe der quadratischen Abweichung des Faktors x
V_x	$[dB^2]$	Varianz des Faktor x
x_i	-	Qualitätsmerkmal
\bar{x}	$[dB]$	Arithmetischer Gesamtmittelwert (Signal/Rausch-Verhältnis)
\hat{x}_i	-	Mittelwert des Qualitätsmerkmal x
$\hat{x}_{i,i-1}$	-	Vorhersagewert des Qualitätsmerkmals x_i

Mechanische Kenngrößen

A	$[mm^2]$	Von einer Kraft F belastete Fläche
d_0	$[mm]$	Ursprüngliche Dicke eines Körpers
Δd	$[mm]$	Dickenänderung eines Körpers in Folge einer Dehnung
D	-	Shorehärte D
E_t	$[N/mm^2]$	E-Modul
F	$[N]$	Wirkende Kraft
G	$[N/mm^2]$	Schubmodul
$\epsilon_{\text{längst}}$	$[\%]$	Normaldehnung
ϵ_M	$[\%]$	Bruchdehnung
ϵ_{quer}	$[\%]$	Querdehnung
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	$[g/cm^3]$	Bauteildichte
σ_M	$[N/mm^2]$	Zugfestigkeit
ξ	$[^\circ]$	Scherungswinkel
τ	$[N/mm^2]$	Schubspannung

Optische Kenngrößen

a_K	$[mm]$	Maß zur Beschreibung des Kantenzustandes
F_K	$[mm^2]$	Abweichende Fläche von Ist- zu Sollkontur
l_n	$[mm]$	Messstrecke

l_N	[mm]	Nachlaufstrecke
l_r	[mm]	Einzelmessstrecke
l_t	[mm]	Taststrecke (Messstrecke mit Vorlauf- und Nachlaufstrecken)
l_v	[mm]	Vorlaufstrecke
n_E	-	Anzahl der Einzelmessstrecken
\varnothing_B	[mm]	Ist-Bohrungsdurchmesser von PKG_02
R_a	[μm]	Arithmetischer Mittenrauwert
R_t	[μm]	Gesamthöhe des Profils
R_{Sm}	[μm]	Mittlere Rillenbreite der Profilelemente
R_z	[μm]	Gemittelte Rautiefe
r_{tip}	[μm]	Maximaler Tastspitzenradius
r	[mm]	Radius eines Prüfkörperelements
s_{Diag}	[mm]	Ist-Maß von PKG_03 in diagonaler Richtung
s_x	[mm]	Ist-Maß von PKG_02 in X-Richtung
s_y	[mm]	Ist-Maß von PKG_02 in Y-Richtung
s_z	[mm]	Ist-Maß von PKG_02 in Z-Richtung
S_z	[μm]	Maximale Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
ΔE	-	Farbabstand
Δv	[mm]	Maß des Verzugs
λ_c	[mm]	Grenzwellenlänge, die den Übergang von der Rauheit zur Welligkeit definiert
λ_f	[mm]	Grenzwellenlänge, die den Übergang von der Welligkeit zu den Anteilen mit noch längeren Wellenlängen definiert
λ_s	[mm]	Grenzwellenlänge, die den Übergang von der Rauheit zu den Anteilen mit noch kürzeren Wellenlängen definiert

Thermodynamische Kenngrößen

$T_{ef,c}$	[°C]	extrapolierte Endtemperatur der Kristallisation
$T_{ef,m}$	[°C]	extrapolierte Endtemperatur des Schmelzbereichs
$T_{ei,c}$	[°C]	extrapolierte Anfangstemperatur der Kristallisation
$T_{ei,m}$	[°C]	extrapolierte Anfangstemperatur des Schmelzbereichs
T_{EK}	[°C]	Entnahmekammertemperatur
$T_{f,c}$	[°C]	Endtemperatur der Kristallisation
$T_{f,m}$	[°C]	Endtemperatur des Schmelzbereichs
$T_{i,c}$	[°C]	Anfangstemperatur der Kristallisation
$T_{i,m}$	[°C]	Anfangstemperatur des Schmelzbereichs
$T_{p,c}$	[°C]	Kristallisationstemperatur
$T_{p,m}$	[°C]	Schmelztemperatur
T_{PK}	[°C]	Prozesskammertemperatur

Kenngrößen innerhalb der Nachbearbeitungsverfahren

$R_{\delta t}$	[$\text{Pa}^{1/2}$]	Radius des sphärischen Raumes um den Hanse'schen Löslichkeitsparameter
T_{ch}	[°C]	Temperatur des Wirkmediums
v_m	[m^3/mol]	Molares Volumen
δ	[$\text{Pa}^{1/2}$]	Hildebrand'scher Löslichkeitsparameter
δ_D	[$\text{Pa}^{1/2}$]	Dispersionskräfte
δ_H	[$\text{Pa}^{1/2}$]	Wasserstoffbrückenbindungen
ΔH_m	[kJ/mol]	Verdampfungsenthalpie
δ_P	[$\text{Pa}^{1/2}$]	Dipolkräfte
δ_{SP}	[$\text{Pa}^{1/2}$]	Hanse'scher Löslichkeitsparameter
ϵ	[Pa]	Kohäsionsenergiedichte

ABBILDUNGEN UND TABELLEN

Abbildungen

Bild 1-1 - Trend / Einsatz / Potential des Laser-Sinterns	1
Bild 2-1 - Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil, nach [10].....	5
Bild 2-2 - Technologische Prozesskette des Laser-Sinterns.....	6
Bild 2-3 - Verfahrensablauf der Modellaufbereitung.....	7
Bild 2-4 - Aufbau einer STL-Datei in ASCII-Codierung	9
Bild 2-5 - Schichtzerlegung.....	11
Bild 2-6 - Schichtzerlegungsstrategien	12
Bild 2-7 - Methoden zur uniformen Schichtzerlegung	13
Bild 2-8 - Struktur einer CLI-Datei	16
Bild 2-9 - Parametervergabe am Beispiel der Software PSW 3.3.....	17
Bild 2-10 - Verfahrensablauf der Bauphase des Laser-Sinterprozesses	18
Bild 2-11 - Sinterprozess am Beispiel des Anlagensystems DTM 2000	19
Bild 2-12 - Nachbearbeitungsschritte lasergesinterter Bauteile	23
Bild 2-13 - Oberflächenbeschaffenheit lasergesinterter Bauteile	25
Bild 3-1 - Allgemeine Vorgehensweise zur Erfüllung der Zielvorgabe	32
Bild 4-1 - Grundlegender Aufbau der Laser-Sinteranlage Formiga P 100	35
Bild 4-2 - Nomenklatur bei der Positionierung und Orientierung innerhalb der Bauteilfertigung	37
Bild 4-3 - Prüfkörper <i>PKG_01</i> zur Erfassung der geometrischen Produktspezifikationen	39
Bild 4-4 - Prüfkörper <i>PKG_02</i> zur Erfassung der geometrischen Produktspezifikationen	40
Bild 4-5 - Beschreibung der eingesetzten Rauheitskenngößen	42
Bild 4-6 - Kantenzustände einer Außenkante nach DIN ISO 13715	43
Bild 4-7 - Schulterzugstab <i>PKG_03</i> nach DIN EN ISO 3167 [212]	45
Bild 4-8 - Definition des Lab-Farbraumes sowie des Farbabstandes	47
Bild 5-1 - Korngrößenverteilung von Polypropylen.....	55
Bild 5-2 - DSC von Polypropylen verschiedener Alterungsstufen (<i>NP = Neupulver</i> , <i>BP = Bauprozess</i>)	57
Bild 5-3 - Vergleich verschiedener Heizraten	58
Bild 5-4 - MVR-Messungen verschiedener Alterungsstadien von Polypropylen (<i>BP = Bauprozess</i> , <i>NP = Neupulver</i>).....	59

Bild 5-5 - Makroskopische Aufnahmen von Bauteilen, gefertigt mit variierenden Energiedichten..	62
Bild 5-6 - Versuchsplanung	64
Bild 5-7 - Faktorwirkungsdiagramm für die mechanischen Eigenschaften	65
Bild 5-8 - Varianzanalyse verschiedener Bauteilorientierungen auf die Zielgröße E_t	66
Bild 5-9 - Varianzanalyse verschiedener Bauteilorientierungen auf die Zielgröße σ	67
Bild 5-10 - Varianzanalyse verschiedener Bauteilorientierungen auf die Zielgröße ϵ_M	67
Bild 5-11 - Faktorwirkungsdiagramm für die Zielgröße Ra sowie Rz	68
Bild 5-12 - Varianzanalyse nach unten gerichteter Bauteiloberflächen auf die Zielgröße Rz	68
Bild 5-13 - Varianzanalyse nach oben gerichteter Bauteiloberflächen auf die Zielgröße Rz	69
Bild 5-14 - Faktorwirkungsdiagramm für Form- und Maßhaltigkeit	69
Bild 5-15 - Prozentualer Anteil der untersuchten Einflüsse auf die Zielgrößen Form und Maß	70
Bild 5-16 - Optimierte Parameterfenster der betrachteten Zielgrößen	71
Bild 5-17 - Einfluss der Energiedichte auf die Bauteildichte ($\rho_{krit} = 0,85 \text{ g/cm}^3$)	73
Bild 5-18 - Auswertung Bauteildichte	74
Bild 5-19 - Einfluss der Energiedichte auf den E-Modul ($E_{t_krit} = 1750 \text{ N/mm}^2$)	75
Bild 5-20 - Auswertung des E-Moduls	75
Bild 5-21 - Einfluss der Energiedichte auf die Zugfestigkeit ($\sigma_{krit} = 23 \text{ N/mm}^2$)	76
Bild 5-22 - Auswertung Zugfestigkeit	77
Bild 5-23 - Einfluss der Energiedichte auf die Bruchdehnung ($\epsilon_{M_krit} = 5,5 \%$)	77
Bild 5-24 - Auswertung der Bruchdehnung	78
Bild 5-25 - Einfluss der Energiedichte auf die Oberflächengüte ($Rz_{krit} = 100 \mu\text{m}$)	79
Bild 5-26 - Auswertung Oberflächenrauheit Rz	79
Bild 5-27 - Variation der Streckenenergiedichte der Konturbelichtung	80
Bild 5-28 - Makroskopische Aufnahmen von Bauteiloberflächen lasergesinterter Bauteile	81
Bild 5-29 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf Bohrungen	81
Bild 5-30 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf darstellbare Spaltmaße	82
Bild 5-31 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf zylinderförmige Elemente	82
Bild 5-32 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf die darstellbaren Wandstärken	83
Bild 5-33 - Darstellbare Formelemente	83
Bild 5-34 - Ermittlung eines optimierten Parameterfensters	84
Bild 5-36 - Optimierte Prozessparameterfenster	85
Bild 6-1 - Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit des Bauwinkels	86
Bild 6-2 - Schematischer Ablauf einer FEM-Simulation	88
Bild 6-3 - Modulare Programmstruktur	89
Bild 6-4 - Materialverhalten der Subklassen der Anisotropie	93
Bild 6-5 - Experimentell ermittelte Werkstoffkennwerte zur Aufstellung des FEM-Modells	97
Bild 6-6 - Definition verschiedener Elementtypen	98
Bild 6-7 - E-Modul aus Hauptsimulation im Vergleich mit real gemessenen Kennwerten	100

Bild 6-8 - Abweichungen der Messungen des E-Moduls innerhalb der Taguchi Analyse.....	100
Bild 6-9 - Vergleich Nenn- mit Realquerschnitt	101
Bild 6-10 - FEM-Simulation auf Basis von Datenblattinformationen und gemittelten Kennwerten	102
Bild 6-11 - Anpassung der technologischen Prozesskette.....	102
Bild 7-1 - Gemittelte Rautiefe Rz in Abhängigkeit der Orientierung	104
Bild 7-2 - Abhängigkeit der Oberflächenrauheit definierter Bauteilorientierungen (Downskin) über der Scangeschwindigkeit und der Laserleistung der Konturbelichtung	105
Bild 7-3 - Abhängigkeit der Oberflächenrauheit definierter Bauteilorientierungen (Downskin) über der Streckenenergiedichte der Konturbelichtung.....	105
Bild 7-4 - Abhängigkeit der Oberflächenrauheit definierter Bauteilorientierungen (Upskin) über der Scangeschwindigkeit und der Laserleistung der Konturbelichtung	106
Bild 7-5 - Abhängigkeit der Rauheit definierter Bauteilorientierungen (Upskin) von der Streckenenergiedichte der Konturbelichtung.....	106
Bild 7-6 - Ablaufdiagramm der selektiven Flächenbelichtung	107
Bild 7-7 - Detektierung und Zuweisung der Bauteilfacetten	108
Bild 7-8 - Schnittwinkel zwischen Dreiecksfacette und Bauebene.....	109
Bild 7-9 - Ermittlung der Scanpfade.....	110
Bild 7-10 - Mögliche Fälle der Ebene-Dreieck-Durchdringung	111
Bild 7-11 - Aufbereiten der generierten Sinterlinien	112
Bild 7-12 - Ablaufprozedur der orientierungsabhängigen Parameterzuweisung.....	113
Bild 7-13 - Zusammenfassende Abhängigkeit der Oberflächengüte von der Energiedichte und Bauteilorientierung sowie angepasster Belichtungsstrategie	114
Bild 8-1 - Einteilung potentieller Nachbearbeitungsverfahren für lasergesinterte Bauteile	115
Bild 8-2 - Gegenüberstellung der am Markt befindlichen Strahlverfahren	116
Bild 8-3 - Gegenüberstellung der am Markt befindlichen Gleitspanverfahren	117
Bild 8-4 - Gegenüberstellung der thermisch behandelnden Nachbearbeitungsverfahren	118
Bild 8-5 - Gegenüberstellung der beschichtenden Nachbearbeitungsverfahren	119
Bild 8-6 - Verfahrensanalyse Strahlen.....	120
Bild 8-7 - Einfluss verschiedener Strahlmittel und variierender Bearbeitungszeit innerhalb des Feststoffstrahlens	121
Bild 8-8 - Auswertung der Strahlversuche	122
Bild 8-9 - Verfahrensanalyse Gleitschleifen	122
Bild 8-10 - Einfluss verschiedener Verfahrensmittel und variierender Bearbeitungszeit innerhalb des Gleitschleifverfahrens	123
Bild 8-11 - Auswertung der Gleitschleifversuche.....	124
Bild 8-12 - Verfahrensanalyse chemisches Ätzen.....	125
Bild 8-13 - Eingrenzung potentieller Wirkmedien	126
Bild 8-14 - Ergebnisdarstellung der Beständigkeitsuntersuchungen.....	127
Bild 8-15 - Farbgebung innerhalb der Beständigkeitsuntersuchungen	127
Bild 8-16 - Einfluss von Temperatur und Zeit ausgewählter Wirkmedien auf Rz.....	129

Bild 8-17 - Mikroskopische Aufnahmen der nachbehandelten Oberflächen	129
Bild 8-18 - Prozentuale Gewichtsabweichung ausgewählter Wirkmedien	130
Bild 8-19 - Verformungsdefekte bei der chemischen Nachbearbeitung.....	131
Bild 8-20 - Einfluss von Decalin auf die Grundkörpergeometrien	131
Bild 8-21 - Einfluss von Toluol auf die reduzierten Grundkörpergeometrien	132
Bild 8-22 - Einfluss von m-Xylol auf die reduzierten Grundkörpergeometrien	132
Bild 8-23 - Einfluss von Terpentinersatz auf die reduzierten Grundkörpergeometrien	133
Bild 8-24 - Oberflächengüte nach der chemischen Nachbearbeitung mit optimiertem Parametersatz	134
Bild 8-25 - Formhaltigkeit nach der chemischen Nachbearbeitung mit optimiertem Parametersatz	134
Bild 8-26 - Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch ausgewählte Wirkmedien	135

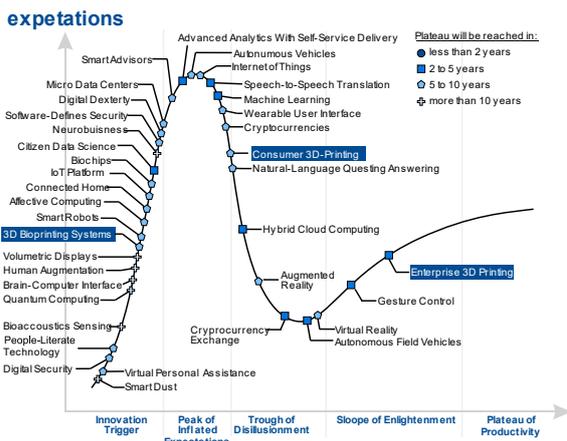
Tabellen

Tabelle 4-1 - Definition der Zielgrößen und deren Einsatz innerhalb der vorliegenden Arbeit	38
Tabelle 4-2 - Messbedingungen für die Rauheitsmessungen	42
Tabelle 4-3 - Auflösung von Versuchsplänen, in Anlehnung an [225]	48
Tabelle 5-1 - Versuchsplanung zur Eingrenzung und Verifizierung der Einflussfaktoren	63
Tabelle 5-2 - Versuchsplanung zur empirischen Modellbildung sowie modellgestützten Optimierung	72
Tabelle 6-1 - Klassifizierung der Materialmodelle, in Anlehnung an [143]	90
Tabelle 6-2 - Zusammengefasste Werkstoffkennwerte des orthotropen Materialmodells	98
Tabelle 7-1 - Definition der Winkelabhängigen ID`s	110

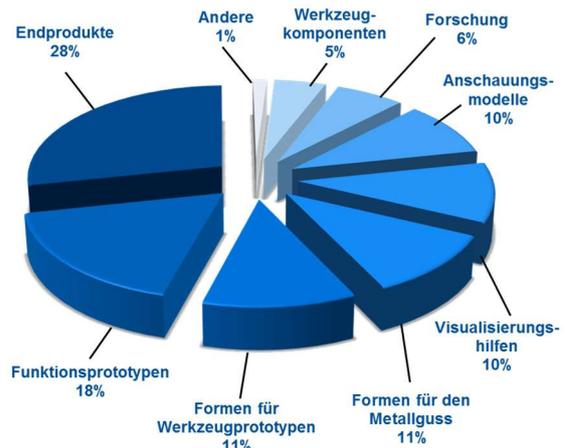
1 EINLEITUNG

In Abgrenzung zu den konventionellen Fertigungsverfahren fasst die verhältnismäßig junge Technologie der additiven Fertigung, wie beispielsweise das Laser-Sintern, alle Verfahren zusammen, die Bauteile auf Basis von 3D-CAD Modellen durch schichtweises Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen herstellen [1]. Dabei haben sich die additiven Fertigungsverfahren in den letzten Jahren zu effektiven Werkzeugen für die schnelle Entwicklung von Produkten nahezu variabler Komplexität entwickelt. Gerade im Bereich der Individual- und Kleinserienfertigung gewinnen additive Fertigungsverfahren immer mehr an Bedeutung. Durch die schichtweise Fertigung können Produkte mit nahezu jeder Komplexität gefertigt werden, da die Gesamtgeometrie des Bauteils in der aktuell zu fertigenden Schicht nicht von Bedeutung ist [1], [2].

Im diesjährigen von der Marktforschungs- und Beratungsfirma Gartner veröffentlichten Hype Cycle hat neben den Technologien *Wearable User Interface*, *Cryptocurrencies* oder dem *Natural-Language Questing Answering* auch das *3D-Printing*, also die additive Verfahrenstechnik, den Gipfel der überzogenen Erwartungen überschritten [3]. Somit wird erwartet, dass genannte Technologien innerhalb der nächsten 5 Jahre auf ihrem Produktionsplateau angekommen sein werden, vergleiche Bild 1-1 a). Besonders die unter dem Begriff des 3D-Druckens geprägten, kompakten und kostengünstigen Anlagen dringen durch eine starke Medienpräsenz in das Bewusstsein der Öffentlichkeit [4], [5], [6], [7]. Bei der Betrachtung der Einsatzgebiete additiv gefertigter Bauteile aus aktuellen Umfragen des Wohlers Reports zeigt sich weiter, dass Unternehmen die additiven Fertigungsverfahren überwiegend für Endprodukte, gefolgt von Funktionsprototypen nutzen [8], Bild 1-1 b).



a) Hype Cycle, in Anlehnung an [3]



b) Einsatzgebiete additiv gefertigter Bauteile, in Anlehnung an [8]

Bild 1-1 - Trend / Einsatz / Potential des Laser-Sinterns

Die Fortsetzung dieser beiden Entwicklungen, d.h. sowohl die Erschließung des Privatanwendersektors durch 3D-Drucker als auch der Übergang vom Rapid Prototyping hin zum Rapid Manufacturing setzt allerdings auch die Überwindung definierter Anforderungen vo-

raus. Diese beinhalten unter anderem die Sicherung und Optimierung des Eigenschaftsprofils wie auch deren Reproduzierbarkeit, die Erweiterung der Materialpalette, die Erhöhung des Prozessverständnisses und der Prozessstabilität sowie der wirtschaftlichen Fertigung.

Das Materialspektrum bei allen kunststoffverarbeitenden, additiven Fertigungsverfahren ist nach heutigem Stand deutlich begrenzt und bildet die Palette bekannter Konstruktionswerkstoffe nur bedingt ab, vergleiche Kapitel 2.2. Einen besonderen Stellenwert innerhalb des Laser-Sinterverfahrens nimmt der Werkstoff Polyamid 12 (*PA 12*) mit einem Marktanteil von 95 % ein [8], [9], obwohl er mit einem weltweiten Gesamtproduktionsanteil von < 1 % [10] bei der konventionellen Verarbeitung eine Nebenrolle innehat. Alternative Materialien, wie beispielsweise Polypropylen mit einem weltweiten Gesamtmarktanteil von 22 % [11], [10] sind zwar kommerziell verfügbar, haben sich aber trotz der generellen wirtschaftlichen Eignung noch nicht am Markt durchsetzen können. Im Ergebnis können die Materialanforderungen im Bereich der Kunststoffverarbeitung nicht abgedeckt werden. Weiter hat sich die Fokussierung auf PA 12 [12] im Jahr 2012 durch einen Schadensfall im Chemiapark Marl negativ bemerkbar gemacht mit der Konsequenz einer Rohstoffverknappung des Werkstoffs und damit bedingten massiven Liefereinschnitten.

Ein Grund für die fehlende Präsenz alternativer Materialien kann sowohl in der schwierigen Verarbeitung der Werkstoffe als auch im mangelnden Prozessverständnis innerhalb der Laser-Sinterfertigung gefunden werden. So gehen in einschlägigen Publikationen die Kernaussagen zu optimalen Verarbeitungsbereichen schon beim Standardwerkstoff Polyamid 12 teilweise weit auseinander, vergleiche Kapitel 2.7.2. Ein einheitliches Bild zur Ermittlung von Korrelationen zwischen Prozessparametern und definierten Zielgrößen, wie den mechanischen Bauteileigenschaften und den geometrischen Produktspezifikationen, wurde bisher nicht vermittelt und belegt das bisher rudimentäre Prozessverständnis. Eine Qualifizierung und eine im Ergebnis robuste Verarbeitung neuer Werkstoffe stellt den Anwender somit vor große Herausforderungen, da das vorhandene Wissen bisheriger Materialqualifizierungen nur bedingt übertragen werden kann.

Durch die Erschließung neuer einsetzbarer Werkstoffe erhöht sich zugleich die Zahl der Einsatzgebiete für die additive Fertigung. Potentielle Anforderungsprofile können generell unter den Begriffen Funktionsintegration, Individualisierung und komplexe Geometrien zusammengefasst werden [13]. Eine tragende Rolle für die Entwicklung neuer Produkte stellt die Simulation mittels Finite-Elemente-Methode dar, um die Bauteileigenschaften zur Vorhersage und Steuerung bzw. der Bauteiloptimierung (Parameter-, Topologie- und Formoptimierung) abbilden zu können. Materialdaten der Pulverhersteller bieten nur eine bedingte Grundlage für die erforderlichen Simulationsparameter, da hier keine maschinen-, prozess- und fertigungsabhängigen Einflüsse berücksichtigt werden.

Besonders die Handhabung der Oberflächengüte stellt eine große Herausforderung auf dem Weg zur Akzeptanz additiv gefertigter Werkstücke dar. Im Vergleich zu zerspannten oder spritzgegossenen Kunststoffbauteilen haben lasergesinterte Bauteile auf Grund des schichtweisen Aufbaus aus einem pulverförmigen Grundmaterial eine relativ raue Oberfläche. Durch eine angepasste Prozessführung sowie durch optimierte Scanstrategien kann diese zwar reduziert, allerdings nicht vollständig eliminiert werden. Einen wertvollen Beitrag liefert hier die Oberflächentechnik, um das Einsatzspektrum zu erweitern [13]. Grundbaustein für den Weg zum Rapid Manufacturing, der schnell anpassbaren und effizienten Verwirklichungen von Produktinnovationen in kleinen Fertigungsserien, besteht somit in der Findung und Qualifizierung automatisierter Folgeverfahren, die zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität führen.

2 VERFAHRENSGRUNDLAGEN

2.1 Einordnung und Systematik der additiven Fertigungsverfahren

Das Verfahrensprinzip der additiven Fertigungstechnik geht maßgeblich auf das Jahr 1986 zurück, in dem Charles Hull durch das Patent mit dem Titel „*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*“ die Grundlage zur Entwicklung eines kommerzialisierbaren Systems schafft [14]. Motiviert von der Idee der Flachdrucktechnik, in der durch wiederholtes Drucken von dünnen Schichten räumliche Gebilde hergestellt werden, beschreibt Hull in seinem Patent einen Prozess, bei dem dünne Schichten eines flüssigen UV-reaktiven Harzes durch eine programmierbare Lichtquelle ausgehärtet werden und das Objekt somit Schicht für Schicht gefertigt wird. Darauf aufbauend stellte die von Hull neu gegründete Firma *3D Systems* im November 1987 die erste Stereolithografieanlage, die *SLA-1*, auf der Fachmesse AutoFact in Detroit vor [1], [13]. Der Stereolithografie folgte sehr bald eine Reihe von weiteren Verfahren, die alle nach dem Grundprinzip des schichtweisen Aufbaus von Objekten arbeiten. Insgesamt lassen sich der additiven Fertigungstechnik heute etwa 30 verschiedene Verfahren unterordnen, welche sich im Ausgangsmaterial sowie dem technologischen Prinzip voneinander unterscheiden [15].

Auf Grund der Vielzahl und der Variantenvielfalt an untergeordneten Verfahren ist eine Klassifizierung nicht immer eindeutig. In der Literatur existiert diesbezüglich eine Vielzahl von unterschiedlichen Darstellungen. Da es sich letztendlich um Fertigungsverfahren im allgemeinen Sinn handelt, ist an erster Stelle eine Einordnung nach DIN 8580 [16] mit ihren sechs Haupt- und Untergruppen sinnvoll. Demnach können die additiven Fertigungsverfahren der Hauptgruppe 1, den urformenden Fertigungsverfahren (DIN 8581) untergeordnet werden; das Laser-Sintern folgerichtig also den urformenden Fertigungsverfahren aus pulverförmigen Feststoffausgangsmaterial. Als aufbauende Fertigungsverfahren ist allerdings auch eine Zuordnung in die Hauptgruppe 4 - *Fügen* (DIN 8593-0), die Hauptgruppe 5 - *Beschichten* sowie in die Hauptgruppe 6 - *Stoffeigenschaften ändern* zu rechtfertigen. Eine weitere Einordnung kann nach Burns anhand der Änderung des Werkstoffvolumens im Bauteil während des Fertigungsprozesses erfolgen [17]. Unterschieden wird hier nach *subtraktiven* (das Volumen wird verringert), *formativen* (das Volumen bleibt konstant) und *additiven* (das Volumen wird vergrößert) Fertigungsverfahren. Auch diese Einteilung gerät bei der Betrachtung einzelner Verfahren an ihre Grenzen. So werden die Schichten innerhalb des *Layer Laminated Manufacturing* jeweils aufeinander geklebt, also gefügt, die tatsächliche Formgebung erfolgt jedoch über trennende Verfahren. Neuere Ansätze orientieren sich gemäß der Normung des Urformens primär an dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials. In untergeordneten Ebenen werden die Verfahren weiter nach der Erscheinungsform des Ausgangsmaterials sowie dem Wirkmechanismus der Schichtbildung klassifiziert [1], [13], [18].

Die VDI Richtlinie 3405 grenzt die additiven Fertigungsverfahren von den konventionellen Verfahren ab und definiert eine neue Verfahrensgruppe [19]. Da sich im Laufe der Zeit eine Reihe von Begrifflichkeiten für die Vielzahl der additiven Fertigungsverfahren gebildet hat, ist es zudem das gesetzte Ziel der Richtlinie eine einheitliche Nomenklatur zu definieren.

So finden sich viele firmenspezifische, geschützte Begriffe durch die Maschinenhersteller. Marketingbegriffe wie das 3D-Drucken, welches ein einfaches Herstellen ähnlich dem 2D-Drucken suggerieren soll, sorgen für weitere Verständnisprobleme. Auf Grund der unterschiedlichen Bezeichnungen richten sich die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe nach der VDI Richtlinie 3404 [20] bzw. der Folgerichtlinie VDI 3405 [19]. Hier werden alle Prozessketten, welche Bauteile unter Verwendung additiver Fertigungsverfahren fertigen, unter den *Rapid-Technologien* zusammengefasst. Analog dazu haben sich in Abhängigkeit zu ihrem Anwendungsfeld die Begriffe *Rapid Prototyping*, die Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität, *Rapid Tooling*, der Fertigung von Werkzeugen und -formen, sowie das *Rapid Manufacturing*, die Fertigung von Endprodukten direkt aus Konstruktionsdaten, gebildet [20].

Die Haupteinsatzgebiete der additiven Fertigungsverfahren liegen nach Umfragen von Wohlers primär im Konsumgüter- und Elektroniksektor. Es folgen die Automobilindustrie sowie die Medizintechnik. Durch die stetige Weiterentwicklung der Verfahren etablieren sich die additiven Fertigungsverfahren vermehrt als Serienfertigungsverfahren. So nutzten in Anlehnung an die in Bild 1-1 b) dargestellte Umfrage im Jahr 2006 lediglich 9,6 % der befragten Anwender die Technologien für die Fertigung von Endprodukten. Heute ist deren Einsatz auf etwa 28 % angestiegen. [8], [21]

Neben dem Laser-Strahlschmelzen von Metallen lässt sich auf Grund der guten Materialeigenschaften sowie der Einhaltung der geometrischen Produktspezifikationen besonders beim Laser-Sintern von Kunststoffen ein Trend zur Serienproduktion, dem *Rapid Manufacturing*, erkennen [22].

2.2 Werkstoffe für das Laser-Sintern

Grundsätzlich können mit Hilfe des Laser-Sinter-Prozesses alle Materialien verarbeitet werden, die sich im weitesten Sinne thermoplastisch verhalten - also sowohl amorphe als auch teilkristalline Thermoplaste. Allerdings ergeben sich auf Grund des unterschiedlichen strukturellen Aufbaus maßgebliche Unterschiede für die Prozessführung bei der Verarbeitung beider Werkstoffgruppen [23]. So ist die Schmelze amorpher Thermoplaste unter anderem durch den großen Erweichungsbereich höherviskoser im Vergleich zu teilkristallinen Thermoplasten, weshalb das homogene Zusammenfließen der Schmelze verhindert wird. Im Ergebnis werden prinzipiell geringere Bauteildichten sowie geringere mechanische Eigenschaften und höhere Oberflächenrauigkeiten im Vergleich zu Bauteilen aus einem teilkristallinen Thermoplast erzielt. Damit eignen sich diese zur Herstellung von Urmodellen für Gussverfahren, allerdings weniger für die additive Fertigung von Funktionsbauteilen. Demzufolge werden innerhalb des Laser-Sinterprozesses maßgeblich teilkristalline Thermoplaste verarbeitet [23].

Ob sich ein teilkristalliner Thermoplast verarbeiten lässt, hängt von einer Reihe charakteristischer Werkstoffkennwerte ab. Die wichtigste Anforderung stellt hier das Schmelz- und Kristallisationsverhalten dar. Entscheidend ist zum einen das Temperaturintervall zwischen Schmelz- und Kristallisationsbereich, also das tatsächliche Prozessfenster des Werkstoffes. Je größer dieses Intervallfenster ist, desto besser können unkontrollierte Phasenübergänge von Schmelze und Pulver vermieden werden. Dieses beinhaltet sowohl Kristallisationseffekte durch unerwünschte Abkühlvorgänge (z. B. bei der Pulverbereitstellung) als auch Aufschmelzerscheinungen außerhalb des Belichtungsbereiches durch Überschreitung der Kristallitschmelztemperatur bei zu hohen Bauraumtemperaturen [24], [25]. Zum anderen kommt dem Schmelzbereich des Werkstoffes eine hohe Bedeutung zu. Je schmaler der Bereich

und je höher die Schmelzenthalpie ist, desto schneller und vollständiger schmelzen die Pulverpartikel auf und begünstigen somit die Darstellung filigraner Elemente innerhalb des Laser-Sinterns. Die Schmelztemperatur des Werkstoffs bestimmt dabei die Vorheiztemperatur, vergleiche dazu Kapitel 2.5.1. Neben den thermodynamischen Eigenschaften sind weiter die rheologischen Eigenschaften des flüssigen Kunststoffes von besonderer Bedeutung. Hierbei bestimmen die Viskosität der Schmelze sowie die Oberflächenenergie des Pulvers die Fähigkeit zur Schmelzfilmbildung. Dabei sollte die Viskosität niedrig und die Oberflächenenergie hoch genug sein, um ein Zusammenfließen der geschmolzenen Partikel zu gewährleisten. Andererseits verhindert eine hohe Viskosität und eine niedrige Oberflächenenergie das Versintern außenliegender nicht aufgeschmolzener Partikel. Darüber hinaus stellt die Verarbeitung mit Hilfe des Laser-Sinter-Prozesses hohe Anforderungen an die Schüttguteigenschaften des Pulverwerkstoffes. Besonders sind hier eine gute Rieselfähigkeit zum Auftrag neuer Pulverschichten sowie eine hohe Schüttgutdichte zur Gewährleistung ausgewählter Bauteileigenschaften wie Dichte, Festigkeit und Maßhaltigkeit von großer Bedeutung.

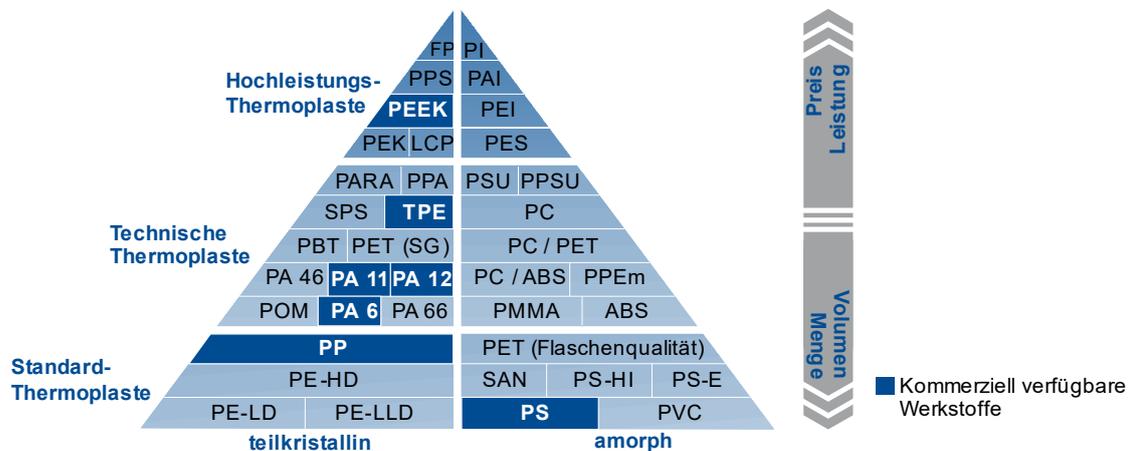


Bild 2-1 - Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil, nach [10]

Eine in der Kunststoffindustrie übliche Unterteilung von thermoplastischen Kunststoffen ist die Aufschlüsselung nach ihrem Eigenschaftsprofil, vergleiche Bild 2-1. So lassen sich Kunststoffe prinzipiell in drei verschiedene Gruppen einteilen. Die erste Gruppe umfasst alle Standard- oder „*Massenkunststoffe*“, welche im Vergleich zu anderen Kunststoffen in sehr großer Menge hergestellt und verwendet werden. Primär finden diese auf Grund ihrer guten Gebrauchseigenschaften und ihrem in der Regel geringen Preis in einer Vielzahl technischer und alltäglicher Anwendungen Gebrauch. Diese bilden die Basis der verfügbaren Kunststoffe. Während sich diese in kunststoffverarbeitenden Industriezweigen, wie etwa dem Spritzguss etabliert haben, stehen innerhalb des Laser-Sinterprozesses nur wenige Standardwerkstoffe zur Verfügung. So finden sich sowohl im Portfolio der Firma *EOS* als auch bei der Firma *3D Systems* Kunststoffe auf Polystyrol-Basis [26], [27]. Deren Anwendungen beschränken sich allerdings auf die Herstellung von Formen für das Feingussverfahren. Weiter ist seit dem Jahr 2012 der Werkstoff Polypropylen über die Firma *Microfol* kommerziell verfügbar [28]. Darüber hinaus finden sich diverse wissenschaftliche Forschungsbeiträge zur Qualifizierung neuer Standardthermoplaste für das Laser-Sintern wie z. B. für PE-HD [15], PE-LD [29] sowie ABS [30].

Den Standardkunststoffen folgen die technischen oder „*Konstruktionsthermoplaste*“. Dieser Gruppe werden alle Kunststoffe untergeordnet, welche dank herausragender Eigenschaften hohe Anforderungen, wie beispielsweise gute Schlagzähigkeit, kleine Wärmeausdehnung, hohe Maßhaltigkeit, Lichtdurchlässigkeit oder Durchlässigkeit gegenüber Gasen erfüllen

können [10], [31]. Innerhalb des Laser-Sinter-Prozesses werden die technischen Kunststoffe primär durch den teilkristallinen Thermoplast Polyamid 12 (PA 12) vertreten. Wie eingangs erwähnt, weist dieser auf Grund seiner guten Eignung für den Laser-Sinter-Prozess einen gesamten Marktanteil von etwa 95 % [32] auf und wird von den meisten Firmen - z. B. *EOS GmbH* [33], *3D-Systems GmbH* [34] und *Arkema* - vertrieben. Darüber hinaus wird PA 12 von den meisten Anbietern auch als mit Glas, Carbonfasern oder Aluminium gefülltes Material vertrieben. Weiter finden sich auf dem Markt die technischen Thermoplaste Polyamid 11 [35] sowie thermoplastische Elastomere [36].

Die dritte und letzte Gruppe *Hochleistungsthermoplaste* zeichnen sich durch hohe Wärmeformbeständigkeiten, also gute Festigkeitswerte über etwa 150 °C oder, durch besondere Ordnungsstrukturen hervorgerufene, gute Grundfestigkeiten aus. Der Marktanteil liegt hier, auf den gesamten Kunststoffmarkt bezogen, bei rund 1 % [10]. Auch für das Laser-Sintern ist lediglich der Hochleistungskunststoff Polyetheretherketon (*PEEK*) von der Firma *EOS* kommerziell verfügbar [37].

2.3 Funktionsprinzip und Verfahrensablauf des Laser-Sinterns

Das Laser-Sinterverfahren wurde an der *University of Texas* (USA) im Jahr 1986 von Carl Deckard erstmalig entwickelt [38], [39] und auf Basis des entsprechenden Patents seit 1992 erstmals durch die Firma *DTM Corp.* kommerziell vertrieben. Im Jahr 2001 übernahm die Firma *3D Systems Corp.* die Rechte von *DTM Corp.* Anfang 1993 begann die Firma *EOS* als europäischer Anbieter mit der Verfahrensweiterentwicklung und stellte im gleichen Jahr die erste Prototypenanlage vor.

Definiert ist das Laser-Sintern als „*additives Herstellungsverfahren, um aus einem pulverförmigen Ausgangswerkstoff mithilfe eines Lasers schichtweise ein Bauteil herzustellen*“ [40]. Das Prinzip des lokalen Versinterns von pulverförmigen Materialien ermöglicht prinzipiell die Verarbeitung aller durch thermische Einflüsse schmelzbaren Werkstoffe wie Kunststoffe, Metalle, Formsande oder Keramiken [20]. Tatsächlich fokussiert sich das Laser-Sintern allerdings auf die Verarbeitung von Thermoplasten, welche zu belastbaren Bauteilen verarbeitet werden und im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen ebenfalls gute mechanische Eigenschaften bei höchster geometrischer Komplexität aufweisen. Weiter belegen Untersuchungen insbesondere bei Kleinserienproduktionen eine energieeffiziente und ressourcenschonende Bauteilproduktion, da Bauteile verschiedener Serien simultan in einem Bauprozess gefertigt werden können [41], [42]. So kann ohne zusätzliche Rohstoff- und Energieinvestition zur Werkzeugherstellung ein funktionsfähiges Bauteil gefertigt werden. Überschüssiges Pulver kann durch eine gezielte Zumischung von Neupulver prinzipiell als qualitativ hochwertiger Ausgangswerkstoff genutzt werden.



Bild 2-2 - Technologische Prozesskette des Laser-Sinterns

Die technologische Prozesskette des Laser-Sinterns lässt sich grundsätzlich analog zu allen weiteren additiven Fertigungsverfahren, in die in Bild 2-2 beschriebenen Verfahrensschritte gliedern und ist charakterisiert durch die Modellerstellung, die Modellaufbereitung, den eigentlichen Bauprozess und die Nachbereitung der gefertigten Bauteile.

2.4 Modellaufbereitung

Die additive Fertigung stellt im Allgemeinen die Abbildung eines virtuellen Datensatzes in ein physikalisches Modell dar [1]. Aus diesem Grund soll der Erzeugung und der Aufbereitung in diesem Kapitel besondere Bedeutung beigemessen werden. Der generelle Verfahrensablauf kann mit Hilfe der in Bild 2-3 dargestellten datentechnischen Prozesskette beschrieben werden und umfasst vier Teilschritte.



Bild 2-3 - Verfahrensablauf der Modellaufbereitung

Ausgangsbasis stellt eine geeignete Repräsentation des Produktes in Form eines Flächen- oder Volumenmodells dar. Dabei spielt es grundsätzlich keine Rolle, wie der 3D-Datensatz erzeugt wird. So können 3D-CAD-Modelle durch einschlägige 3D-CAD-Software erstellt werden, aber auch auf Grundlage von 2D-CAD-Zeichnungen, Messdaten geometrischer Körper in Form von Punktwolken oder Bilddaten verarbeitet werden. Letztere müssen zunächst durch geeignete Verfahren der Datenerfassung (Stichwort: *Reverse Engineering*) aufbereitet werden [43], [44]. In jedem Fall muss eine eindeutige Beschreibung des Bauteils mit einer geschlossenen Bauteiloberfläche vorliegen.

Sofern notwendig, wird die vorliegende Bauteilbeschreibung in eine für die additive Fertigung interpretierbare Datenform konvertiert. Anschließend erfolgt die Positionierung und Orientierung der Bauteilgeometrie innerhalb eines virtuellen Prozessbauraums. Auf Grundlage der Fertigungslage erfolgt eine virtuelle Schichtzerlegung, aus der die für das Anlagensystem notwendigen Schichtinformationen gewonnen werden. Mit der Parametervergabe werden die Belichtungsstrategien definiert.

2.4.1 Beschreibung der Modelloberfläche / Triangulation

Die vorliegenden geometrischen Bauteilinformationen müssen zur weiteren Verarbeitung in der Regel über geeignete Schnittstellenformate, in denen die Geometrie durch mathematische Beschreibungen approximiert wird, zwischen den verschiedenen Softwaresystemen ausgetauscht werden (die einzige Ausnahme bildet das *Direct Slicing*, vergleiche Abschnitt 2.4.3). Über das Schnittstellenformat wird das nativ oder neutral vorliegende CAD-(Volumen)-Modell in eine Beschreibung für Facettenmodelle konvertiert, welches für die Erlangung der notwendigen Schichtinformationen notwendig ist. In Anlehnung an die Vielzahl und rasante Weiterentwicklung an verschiedenen additiven Fertigungsverfahren existieren heute eine Reihe unterschiedlicher Austauschdatensätze. Zum einen wurden auf die jeweiligen additiven Fertigungsverfahren zugeschnittene Facettenformate entwickelt. Deren wichtigste Vertreter sind:

- *AMF* - Additive Manufacturing Format [45]
- *3MF* - 3D Manufacturing Format [46]

- *CFL - Cubital Facet List* [47]
- *eSTL - Enhanced STL* [48]
- *LMI - Layer Manufacturing Format* [49]
- *PLY - Polygon File Format*
- *RP - openRP File Format*
- *RPI - Rapid Prototyping Interface* [50]
- *SIF - Solid Interchange Format* [51]
- *STL - Standard Triangulation Language* [52]
- *STH - Surface Triangles Hinted Format* [53]
- *VRML - Virtual Reality Language* [54]

Zum anderen wird auf bereits bestehende neutrale Datenformate zurückgegriffen:

- *IGES - Initial Graphics Exchange Specification* (IGES) [55]
- *STEP - Standard for the Exchange of Product Data* (STEP) [56]

Aus oben genannten Datenformaten wird das STL-Format (ursprünglich **ST**ereo**L**ithogra**ph**ie) von den gängigsten CAD-Umgebungen unterstützt und hat sich als de-facto-Standard zum Austausch geometrischer Informationen innerhalb der additiven Fertigungsverfahrenstechnik durchgesetzt [1], [57]. Das Format wurde 1987 durch die *Albert-Battaglin Consulting Group* entwickelt, um der Firma *3D Systems* das Importieren eines 3D-CAD-Modells in ihre Stereolithographieanlagen zu ermöglichen. Trotz fehlender Standardisierung hat sich das STL-Format in nahezu jedem Bereich der additiven Fertigungsverfahren etabliert. Gründe können in der frühzeitigen Veröffentlichung des Datenformats, aber auch in der einfachen mathematischen Beschreibung des 3D-Modells und dem damit verbundenen Schichtzerlegungsalgorithmus gefunden werden. Die Oberflächenstruktur wird hier tesselliert, also mit Hilfe von planaren Dreiecken unterschiedlicher Größe beschrieben. Jede Dreiecksfacette wird nach Bild 2-4 durch ihre drei Eckkoordinaten und den zugehörigen Normalvektor, der senkrecht und in positiver Richtung nach außen von der aufgespannten Dreiecksfläche wegzeigt, definiert. Gespeichert werden die notwendigen Informationen einer jeden Dreiecksfacette in unsortierter Strukturierung entweder innerhalb einer Binär- oder ASCII-Codierung [58]. Letztere kann durch einen Editor ausgelesen werden, besitzt allerdings auch eine höhere Datensatzgröße im Gegensatz zu ersterer:

$$\begin{array}{ccc}
 n_x^{(i)} & n_y^{(i)} & n_z^{(i)} \\
 P_{1,x}^{(i)} & P_{1,y}^{(i)} & P_{1,z}^{(i)} \\
 P_{2,x}^{(i)} & P_{2,y}^{(i)} & P_{2,z}^{(i)} \\
 P_{3,x}^{(i)} & P_{3,y}^{(i)} & P_{3,z}^{(i)}
 \end{array}$$

Formel 2-1

Hier stellen $n_x^{(i)}, n_y^{(i)}, n_z^{(i)}$ die Koordinaten des Normalenvektor der Facette i und $P_{k,x}^{(i)}, P_{k,y}^{(i)}, P_{k,z}^{(i)}$ die Koordinaten des Eckpunktes k dar, wobei für $i = 1, \dots, n$ (n ist die Anzahl der Dreiecksfacetten) gilt.

Durch die Polygondarstellung stellt die Fläche nur eine Approximation der Originalkontur dar. Einstellparameter (*Sehnenhöhe, Abweichung* etc.) steuern die Genauigkeit durch die Größe der Dreiecksfacetten. Weitere Informationen des Volumenmodells (z. B. *Farbgebung, Texturen, Materialgradienten*) können nicht dargestellt werden und gehen verloren. Jede Dreiecksfacette teilt sich mit mindestens zwei weiteren Facetten einen Koordinateneckpunkt, je nach Komplexität ist eine nahezu beliebig große Anzahl denkbar. Die Datei

enthält dabei keine Referenzierungen oder Adressverweise. Demnach wird jeder Eckpunkt durch seine Koordinaten für jede zugehörige Dreiecksfacette mindestens dreimal, je nach Komplexität auch öfter, gespeichert. Das Resultat der redundanten Speicherung ist zum einen eine um das Vielfache höhere Dateigröße und zum anderen können Konflikte in Abhängigkeit von der numerischen Darstellung der reellen Zahlen ausgelöst werden [1].

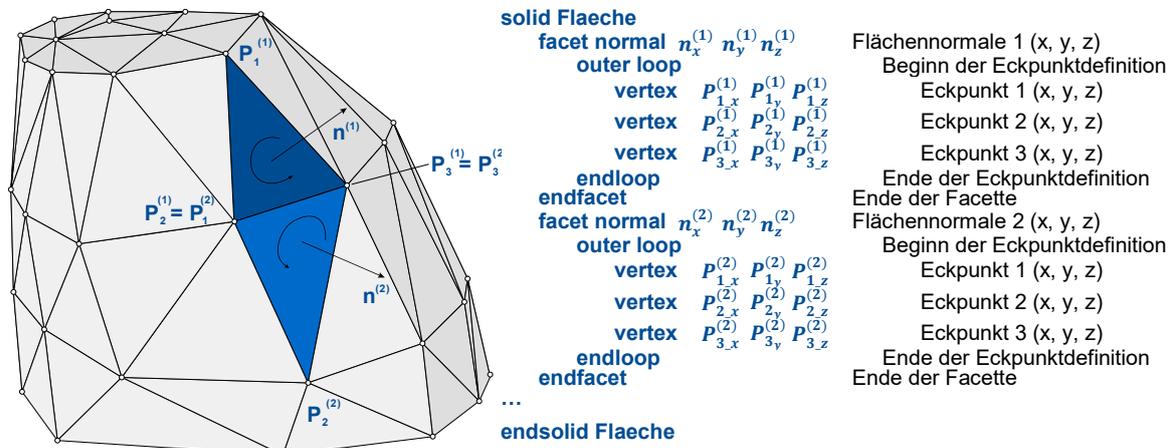


Bild 2-4 - Aufbau einer STL-Datei in ASCII-Codierung

Oben genannte Limitierungen aber auch mathematische Fehler auf Grund des Konvertierungsalgorithmus vom CAD-Datensatz in das STL-Format können zu topologischen Fehlern bei der Vernetzung führen. In Abhängigkeit vom genutzten CAD-System ist die Konvertierung häufig von Fehlern gekennzeichnet. Diese lassen sich nach Hoffmann [59] in *Konstruktions-* (fehlerhafte Modellierungsstrategie, bzw. nicht geeignete oder gänzlich fehlende Datenvorbereitung), *Umsetzungs-* (Rundungsfehler oder ungeeignete Konvertierungseinstellungen) und *Beschreibungsfehler* (Fehlinterpretationen innerhalb des Algorithmus) unterteilen. Grundsätzlich können potentiell auftretende Fehler entweder durch die Modifikation des CAD-Datensatzes und anschließende Neukonvertierung oder durch eine anschließende manuelle Datenreparatur behoben werden. Eine ausführliche Betrachtung möglicher Fehler und deren Auswirkungen auf den folgenden Bauprozess sowie der Bauteilqualität sind unter anderem in [58], [60], [61] und [62] dargestellt.

Obwohl die Anforderungen an das Datenformat additiver Verfahren stetig steigen, hat es innerhalb des STL-Datenformats keine signifikanten Verbesserungen gegeben. Der Bedarf eines alternativen Datenformates wurde schon im Jahr 1990 von Darrach in [63] erkannt. Daher werden immer mehr Konzepte eines alternativen Schnittstellenformats vorgestellt, welche weitere geometrische und topologische Informationen enthalten. Trotz teilweise beträchtlicher Verbesserungen gegenüber dem STL-Format konnten sich diese allerdings bisher nicht etablieren. In [44] stellt Danjou heraus, dass ein alternatives Schnittstellenformat zu einer Optimierung einzelner Prozesse innerhalb der additiven Verfahrenstechnik führen kann. Weiterführend werden hier Produkt- und Prozessinformationen definiert und den auf dem Markt befindlichen Formaten gegenübergestellt.

Derzeitige Bemühungen des von der ASTM initiierten Konsortiums *STL 2.0* belaufen sich auf die Schaffung eines neuen anwendungsgerechten Standards für den Datenaustausch innerhalb der additiven Fertigungstechnik. Das AMF-Datenformat (*Additiv Manufacturing Format*) basiert auf der offenen XML-Struktur und ist somit plattformunabhängig [64]. Auf Grund der unbegrenzten Erweiterbarkeit des Systems bestehen entsprechende Möglichkeiten der Manipulation der Grundstruktur. Informationen zu unterschiedlichen Materialien, Farben, Texturen und weiteren physikalisch-technologischen Eigenschaften können somit gespeichert werden.

2.4.2 Bauteilpositionierung und -orientierung

Wesentlicher Bestandteil der Modellaufbereitung ist die geeignete Auswahl der Bauteilorientierung sowie -positionierung im Bauraum [65]. Durch den vorhandenen Bauraum und die verfahrensbedingte Stützwirkung des Kunststoffpulvers ist die simultane Fertigung mehrerer Bauteile in einem Fertigungszyklus möglich. Die Bauteile werden unter Berücksichtigung definierter Kriterien mit Hilfe entsprechender Software virtuell im Bauraum des Anlagensystems platziert. In Abhängigkeit von der Anzahl und Komplexität der Bauteile erfordert die optimale Anordnung jedoch ein hohes Maß an Erfahrung. So beeinflusst die Bauteilorientierung sowohl Verlauf und Anzahl der aufzuschmelzenden Schichten und somit maßgeblich die Bauteilqualität. Daher müssen zahlreiche Effekte wie der Treppenstufeneffekt oder Auswirkungen anisotroper Materialeigenschaften auf die Festigkeit und das Schrumpfverhalten beachtet werden [66]. Trotz steigender Bauteilkomplexität und stetig wachsender Zahl an Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen existiert heute noch keine zuverlässige algorithmengesteuerte Unterstützung für die Bauteilorientierung und stellt daher einen rein auf Erfahrungswerten basierten Vorgang dar [44]. In den letzten Jahren wurden eine Reihe von Methoden entwickelt, welche die Orientierung des Bauteils nach definierten Kriterien (*Anzahl der Schichten, Optimierung der Bauteilqualität, Minimierung der Fertigungszeit, Minimierung der Nachbearbeitungszeit etc.*) optimieren. Diese beschränken sich allerdings meist auf ausgewählte verfahrensspezifische Teilprobleme und lassen sich in der Regel nicht in eine allgemeine Herangehensweise überführen. Einige Optimierungsansätze sind in [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73] und [74] zu finden. Die dabei verwendeten Methoden und Ziele sind unterschiedlichster Natur und zeigen anschaulich die Komplexität und den Bedarf einer regelbasierten automatisierten Bauteilorientierung.

Weiter hängt die geeignete Platzierung im Bauraum unmittelbar mit der Bauteilorientierung zusammen. Zum einen gilt es aus wirtschaftlicher Sicht die dichteste Packung der Bauteile bei minimaler Bauhöhe anzustreben, um die spezifischen Bauteilkosten so gering wie möglich zu halten. Zum anderen müssen system- und technologiebedingte Problemstellungen berücksichtigt werden. Unter der zwingenden Voraussetzung, dass alle Bauteile entpackbar sind, müssen thermische Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Bauteilen beachtet werden. Zudem ergeben sich bei der Bauraumausnutzung Einschränkungen bedingt durch das Anlagensystem. So hat Goodridge in [75] nachgewiesen, dass die mechanischen Bauteileigenschaften am Bauraumrand und besonders in den Eckbereichen auf einen Bruchteil des gemessenen Maximalwertes abfallen. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf eine inhomogene Temperaturverteilung auf der Pulverbettfläche, dessen Einfluss sich auf weitere qualitätssichernde Bauteileigenschaften, wie die Form- und Maßhaltigkeit sowie die Oberflächengüte, ausweiten lässt. Bestätigt werden diese Beobachtungen durch Wegner in [76]. Die hier mit einer Thermografiekamera aufgenommenen Temperaturverteilungen zeigen bei dem Anlagensystem Formiga P 100 eine maximale Temperaturdifferenz von über 8 K und reduzieren den effektiven Baubereich um 15 mm.

Heutige Softwarepakete bieten dem Bediener erste Ansätze zur automatisierten Platzierung im Bauraum (engl. *Nesting, Packing*). Diese arbeiten entweder nach hüllkörperbasierten oder objektbasierten Ansätzen. Bei ersteren werden zur Beschleunigung von Algorithmen Hüllkörper (*Kugel-, Quader-, Zylinderhüllen, Polytope, etc.*) genutzt. Letzterer Ansatz nutzt die tatsächliche Form des Bauteils, um diese nach rein geometrischen Gesichtspunkten im Bauraum anzuordnen. In der Literatur aufgeführte Ansätze betrachten die Teilprobleme der Orientierung und Bauraumplatzierung meist getrennt. Einen ersten Ansatz für eine allumfassende Multizieloptimierung liefert Danjou in [44]. Dieser beschränkt sich allerdings auf das Laser-Strahlschmelzen von Metallen und ist nur bedingt auf das Laser-Sintern zu überführen.

2.4.3 Schichtdatengenerierung

Der Aufbereitung des triangulierten 3D-Modells sowie der geeigneten Fertigungspositionierung und -orientierung folgt die Bereitstellung der Schichtinformationen. Die additive Fertigung erfordert die Zerlegung des 3D-CAD-Modells in ein 2½D-Schichtkonturenmodell. Der für die additiven Fertigungsverfahren charakteristische schichtweise Aufbau hat den sogenannten Treppenstufeneffekt zur Folge und beeinflusst die Qualität des gefertigten Bauteils maßgeblich. In Abhängigkeit von der Orientierung der Bauteilfläche treten auf Grund des schichtweisen Aufbaus Formabweichungen auf. Zur Quantifizierung des Stufenfehlers führen Dolenc und Mäkelä in [77] erstmals die Spitzenhöhe (eng. *cusp height*) ein, vergleiche Bild 2-5.

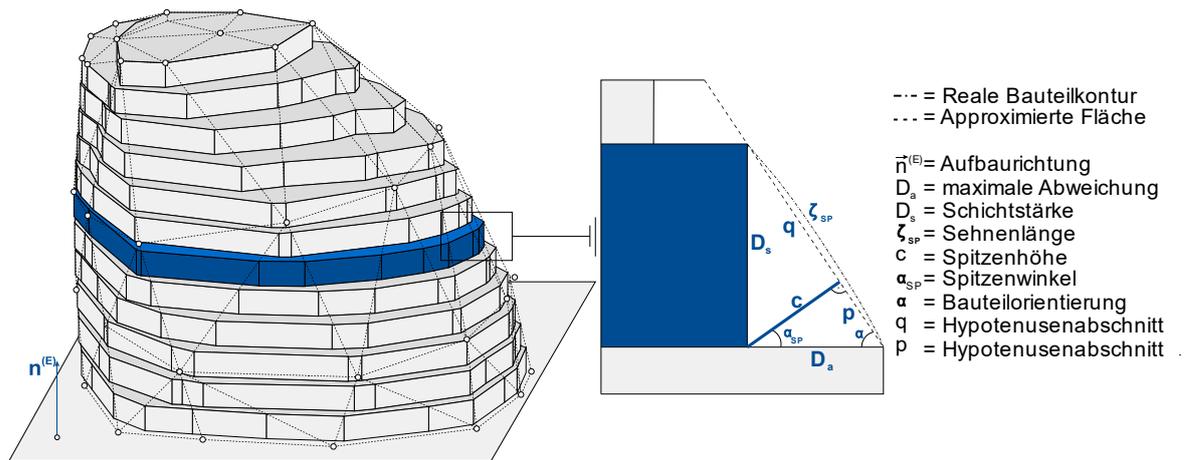


Bild 2-5 - Schichtzerlegung

Die Spitzenhöhe ist definiert als die größte Abweichung zwischen Facetten- und Schichtmodell innerhalb eines imaginären Fehlerdreiecks der aktuellen Schicht und lässt sich mittels geometrischer und trigonometrischer Funktionen berechnen. Unter der Prämisse, dass der Punkt der Spitzenhöhe c die Sehnenhöhe δ in die zwei Hypotenusenabschnitte p und q teilt und rechtwinklig zur Hypotenuse steht, ergibt sich durch den Höhensatz des Euklids folgende Beziehung:

$$c^2 = p \cdot q \quad \text{Formel 2-2}$$

Weiter kann durch die Verwendung des Sinussatzes die Beziehung zwischen der Sehnenlänge ζ_{SP} , der maximalen Abweichung D_a , der Schichtstärke D_s und den gegenüberliegenden Winkeln beschrieben werden:

$$\frac{D_s}{\sin(\alpha)} = \frac{\zeta_{SP}}{\sin(180 - (\alpha_{SP} + \alpha))} = \frac{D_a}{\sin(\alpha_{SP})} \quad \text{Formel 2-3}$$

Ferner gilt bei der Betrachtung der Abschnitte p und q der Hypotenuse ζ_{SP} nach dem Kathetensatz des Euklid:

$$p = \frac{D_a^2}{\zeta_{SP}}, \quad \zeta_{SP} = p + q \quad \text{Formel 2-4}$$

Mit Hilfe von Formel 2-2 bis Formel 2-4 wird die Spitzenhöhe in Abhängigkeit von der Schichthöhe und dem Neigungswinkel der Facette gegenüber der Horizontalen (der Bauplattform) durch folgende Formel beschrieben:

$$c = \sqrt{D_s^2 \cdot (1 - \sin^2(\alpha))}, \quad 0^\circ < \alpha < 180^\circ \quad \text{Formel 2-5}$$

Zur Reduzierung von Formfehlern ist es prinzipiell möglich die Schichtstärke zu verringern und somit die Spitzenhöhe c bzw. den Treppenstufeneffekt zu reduzieren. Die Wahl einer kleineren Schichtdicke hat prinzipiell bessere Bauteileigenschaften zur Folge, führt allerdings auch auf Grund höherer Schichtanzahlen zu einer erhöhten Bauzeit und somit höheren Bauteilkosten. Eine zunehmende Schichtstärke hat somit im Umkehrschluss eine Verstärkung des Treppenstufeneffekts zur Folge. Die Wahl der Schichtdicke stellt daher einen Kompromiss zwischen Bauteilqualität und Wirtschaftlichkeit dar und basiert überwiegend auf den Erfahrungswerten des Maschinenbedieners. Zudem wird die Herabsetzung der Schichtdicke durch die maximale Körnung des eingesetzten pulverförmigen Ausgangszustandes begrenzt, mit dem Ergebnis, dass sich der Treppenstufeneffekt verfahrensbedingt nicht vermeiden lässt. Alternativ kann zur Verringerung des Treppenstufeneffekts ausgewählter Flächen die Bauteilorientierung variiert werden, mit dem Hinblick, dass andere Bauteiloberflächen stärker von dem Treppenstufeneffekt betroffen sein können.

■ Strategien der Schichtdatengenerierung

Die notwendigen Schichtinformationen werden durch eine mathematische Zerlegung der Geometrierepräsentation durchgeführt. Allen Formulierungen ist gemein, dass sie Konturschnitte direkt in die aktuelle Höhenkoordinate des 3D-Modells legen, es handelt sich somit um 2D Informationen. In diesem Kontext lassen sich bestehende Prozeduren in vier verschiedene Ansätze klassifizieren, welche sich aus der Kombination zweier Problemstellungen ergeben - zum einen die direkte Schichtzerlegung aus dem nativen CAD-Format oder die Nutzung eines Zwischenformates und zum anderen die Zerlegung in konstante, uniforme oder variable Schichten [18]. Einen Überblick der verschiedenen Strategien zur Schichtzerlegung und deren wichtigsten Vertreter ist in Bild 2-6 dargestellt.

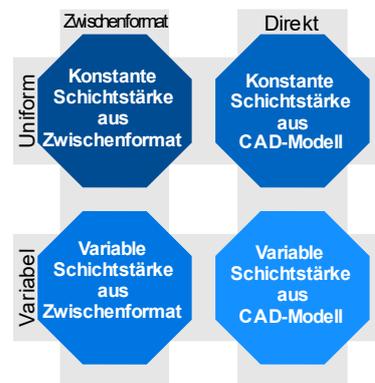


Bild 2-6 - Schichtzerlegungsstrategien

Die Fertigung durch den Laser-Sinterprozess ermöglicht es dem Maschinenbediener mehrere Bauteile verschachtelt innerhalb eines Bauprozesses und damit auch pro Belichtungsschicht zu platzieren, wodurch die uniforme Schichtzerlegung einen besonderen Stellenwert einnimmt. Hier besitzen alle Schichten eine gleichmäßige Stärke (standardmäßig $0,1 \text{ mm}$ beim Laser-Sintern) [78].

Auf Grund der einfachen mathematischen Beschreibung hat sich für die additiven Fertigungsverfahren die Schichtzerlegung anhand eines für facettierte Modelle geeigneten Datenformates, siehe Abschnitt 2.4.1, etabliert. Allerdings muss hervorgehoben werden, dass sich durch die Überführung in ein Zwischenformat auch bereits diskutierte Problematiken ergeben. Die Originalgeometrie wird durch die notwendige Tessellierung nur approximiert

dargestellt, die oftmals fehlerhafte Beschreibung durch fehlende oder sich schneidende Facetten schafft Probleme bei der Schichtdatengenerierung und die Dateigröße beträgt auf Grund redundanter Informationen ein Vielfaches der Original-CAD-Datei, siehe Kapitel 2.4.1. Trotz der Nachteile hat sich die mathematische Zerlegung der Geometrirepräsentation durch die Zuhilfenahme eines Schnittstellenformates durchgesetzt, nicht zuletzt durch die herausragende Stellung des STL-Formats als de-facto Standard. Die Berechnung der Bauteilkonturen basiert hier primär auf der Berechnung von Schnittkurven jeder einzelnen Dreiecksfacette mit einer virtuell aufgespannten Ebene. Jede Ebene repräsentiert hierbei eine Belichtungsebene, deren Normalenvektor in Baufortschrittsrichtung zeigt, vergleiche Bild 2-7 a) und nach jeder Bauteilkonturberechnung um die Schichtdicke D_s inkrementell erhöht wird. Dabei gilt:

$$z_1 \leq z_i < z_2 ; z = z_{\text{aktuell}} \quad \text{Formel 2-6}$$

Bei einer Übereinstimmung der Höhe des Schnittes mit der Lage des Dreiecks werden die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte (a_{12} und a_{23}) der Schnittkante zwischen aufgespannter Ebene und aktueller Dreiecksfacette nach folgender Beziehung berechnet:

$$x = x_1 + \frac{z_1 - z}{z_1 - z_2} \cdot (x_2 - x_1) \quad \text{Formel 2-7}$$

$$y = y_1 + \frac{z_1 - z}{z_1 - z_2} \cdot (y_2 - y_1) \quad \text{Formel 2-8}$$

Da alle Facetten zunächst getrennt voneinander betrachtet werden, müssen alle Schnittpunkte nachträglich sortiert und als Konturlinie miteinander verbunden werden. Auf Grund der Komplexität der nachträglichen Sortierung stellen Rock und Wozny in [79] ein alternatives optimiertes Sortierverfahren vor, siehe Bild 2-7 b). Ausgehend von einer beliebigen Facette und einer schneidenden Kante (K_{12}) wird die gegenüberliegende dritte Eckkoordinate (P_3) der Facette dahingehend untersucht, ob sie sich über oder unter der Schnittebene befindet. Liegt sie darüber, wird die Kante mit der zweiten Eckkoordinate geschnitten (K_{23}), ansonsten mit der Ersten (K_{21}). Dadurch ist die nächste Schnittkante bekannt und die Abfolge wiederholt sich bis zum Erreichen der anfänglichen Kante. Da der Algorithmus nach jeder rechnerisch ermittelten Schnittkante jede Facette dahingehend überprüft, ob diese einerseits die Ebene schneidet und andererseits an die vorangegangene Facette angrenzt, steigt der Rechenaufwand jedoch exponentiell zur Anzahl der Facetten.

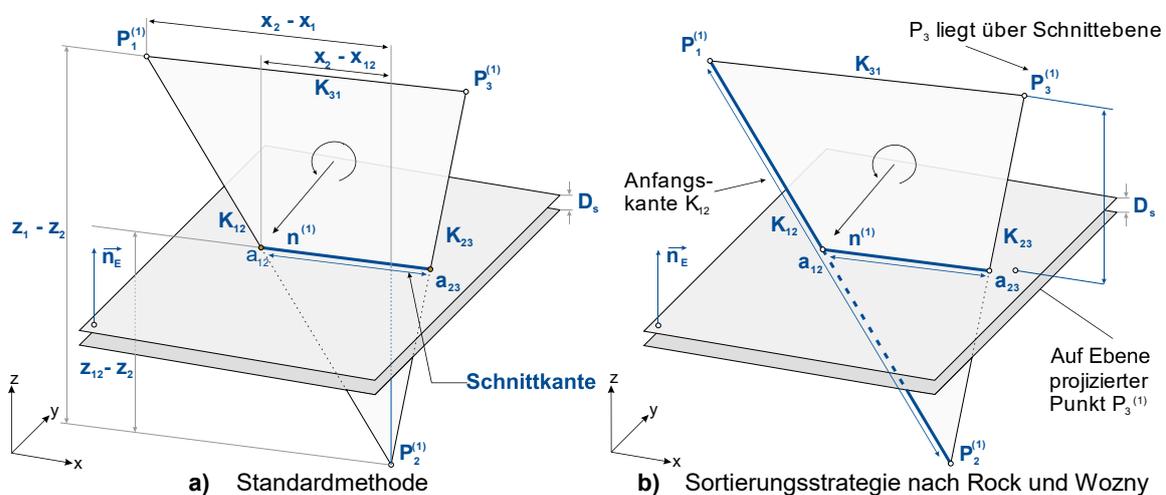


Bild 2-7 - Methoden zur uniformen Schichtzerlegung

Als Alternative zur Schichtdatengenerierung über ein trianguliertes Facettenmodell wurden in verschiedenen Forschungsansätzen alternative Konzepte entwickelt, die die Schichtzerlegung direkt aus dem nativen CAD-Modell oder einem neutralen Standardformat (engl. *direct slicing*) ermöglichen. In der Theorie führen diese Methoden zu einer exakten Darstellung der Schnittkontur, da der reelle Fehler zwischen CAD-Modell und dem Schichtmodell berücksichtigt wird. Allerdings ist die Generierung der Konturdaten sehr komplex. Dementsprechend existiert eine Reihe von verschiedenen Ansätzen, welche grob in zwei Hauptgebiete der analytischen und numerischen Beschreibung der Bauteiloberfläche unterteilt werden können. Erstere Strategie verfolgt unter anderem Guduri sowie Farouki und König, indem Sie die Bauteilkonturen mit Hilfe von Quadriken, also der Beschreibung von Flächen mit Polynomen zweiter Ordnung, darstellen [80], [81], [82]. Ansätze beispielsweise von Rajagopalan [83] oder Kirschmann [84] hingegen nutzen *non-uniform rational B-Splines* (kurz: NURBS) zur Beschreibung der Bauteilkontur. Weitere Methoden zur Repräsentation des 3D-Modells basieren auf der Aussendung von Strahlen basierenden Algorithmen (eng. *ray tracing*) [85] oder gitterbasierten Punktbeschreibungen (eng. *Surfel-Grid*) [86], [87], [88], [89]. Allen Ansätzen ist gemein, dass durch die Eliminierung redundanter Dateninformationen die Datengröße lediglich einen Bruchteil einer STL-Datei beträgt und in der Regel notwendige Aufbereitungsprozesse entfallen. Allgemein sind genannte Ansätze auf spezifische Dateitypen ausgelegt und damit an ein CAD-System gebunden. Zudem lässt sich der Vorteil der theoretisch genaueren Darstellung der Schnittkontur durch die Restriktionen heutiger Anlagensysteme nicht voll nutzen, da diese die ermittelten Konturdaten auf Grund der vektoriellen Steuerung letztendlich doch wieder durch einen Polygonzug approximieren.

Im Gegensatz zur uniformen Schichtzerlegung werden bei der adaptiven Schichtzerlegung variable Schichtstärken in Abhängigkeit von Geometrieänderungen genutzt. Erstmals wurde der Ansatz von Dolenc und Makela [77] durch die Einführung der Stufenhöhe (engl. *cusp height*) qualifiziert. Eine vom Benutzer gewählte Toleranz c_{\max} ist hierbei der Ausgangspunkt und schränkt die Schichtstärke ein. Ein Algorithmus prüft jeden Punkt auf der Oberfläche des Modells zwischen zwei Schichtniveaus. Genannter Ansatz wird durch Sabourin in [90] aufgegriffen. Hier wird das Modell zunächst in gleichmäßige Schichten zerlegt. In einem weiteren Schritt werden dann alle Schichten, welche die Cusp Height Toleranz nicht erfüllen, in feinere Schichten unterteilt. In [91] erfolgt eine Abgrenzung des äußeren und inneren Belichtungsbereichs des Bauteils. Der Innere wird hierbei mit maximaler Schichtstärke generiert und der äußere, formgebende Bereich wird mit unterteilten bzw. verfeinerten Schichtstärken dargestellt. Tyberg und Bohn [92] analysieren in diesem Kontext die Geometrieeigenschaften des Bauteils und fassen diese in Gruppen zusammen. Jeder Untergruppe wird eine individuelle, adaptive Schichtstärke zugewiesen. Einen ähnlichen Weg geht Tata in [93], welcher auf die Extraktion geometrischer Baumerkmale aus dem topologielosen STL-Datenformat abzielt. Ein Facettenprozessor sortiert zunächst die Facetten der STL-Datei und fasst diese zusammen. In einem nächsten Schritt werden die kritischen Besonderheiten und Eigenschaften des Modells durch einen Key-Feature-Identifier erkannt und gespeichert. Ein Schichtstärkenrechner bestimmt im dritten Schritt nach vier Kriterien die optimierte Schichtstärke und erstellt in einem letzten Schritt schließlich die Schichten. Herausstellendes Merkmal bei Cornier [94] ist, dass die Cusp Height des Bauteiles nicht einheitlich sein muss. Die Modelloberflächen werden anhand von Krümmungsanalysen unterteilt und mit einer vom Benutzer interaktiv festgelegten Cusp Height definiert.

Darüber hinaus kombinieren Jamieson und Hacker erstmals beide Ansätze der adaptiven und direkten Schichtzerlegung [95]. Nach einer Zerlegung des CAD-Modells mit einer Standardschichtdicke werden die adjazenten Konturen verglichen. Bei gleicher Geometrie wird die Schichtstärke auf ein Maximum gesetzt, bei Unterschieden wird die Schichtdicke schrittweise bis zu einer definierten Toleranzklasse verringert. Die Strategie wird unter anderem

durch Zhao und Laperrière in [96] weiterentwickelt. Weitere Ansätze fokussieren sich zur Reduzierung der geometrischen Abweichung auf die exakte mathematische Beschreibung der Schnittkontur des CAD-Modells innerhalb der Bauebene und berechnen die lokale Schichtdicke entweder durch das Fehlermaß der Spitzenhöhe [97] anhand verschiedener Kontur-Sets [98], [99] oder bogenförmigen Kurvenstücken [100]. Alternative Strategien berechnen die optimale Schichtstärke durch die Abschätzung der Modelloberfläche anhand differentialgeometrischer Beschreibungen der aktuellen und folgenden Schicht. So wird die Konturkurve bei Suh und Wozny [101] bzw. bei Kulkarni und Dutta [102] durch eine Kugel mit dem Radius $\rho = 1/\kappa$ (κ stellt das Bogenmaß zwischen dem Schnittpunkt der aktuellen und folgenden Ebene mit der Einhaltung der Spitzenhöhentoleranz δ dar) approximiert. Der gewählte Ansatz wurde unter anderem durch Hope und Xu weiterverfolgt, indem die Oberflächenkrümmung durch definierte Benutzereingaben berechnet wird [103], [104], [105]. Innerhalb des *region-based adaptive slicing* nach Mani oder Weyin und Peiren wird das CAD-Modell zunächst in Abhängigkeit der kritischen Oberflächeneigenschaften nach ihren Anforderungen in unterschiedliche räumliche Sektionen sondiert und mit separaten Schichtdicken definiert [106]. Liao und Chui greifen die Top-Down- und Bottom-Up-Strategie auf und kombinieren diese in Abhängigkeit von der Geometrie [97]. Kumar und Choudhury verfolgen hingegen einen dreidimensionalen Ansatz, welcher auf der Approximation der einzelnen Schichten des CAD-Modells durch kubische Füllstücke beruht. Zudem wird in Anlehnung an die Spitzenhöhe das Spitzenvolumen (eng. *cusp volume*) als Fehlermaß eingeführt [107], [108]. Darüber hinaus existieren weitere Ansätze, nach denen sowohl tessellierte Modelldaten als auch die CAD-Daten direkt verarbeitet werden können. So wird von Pandey ein stochastisches Modell genutzt, um den Zusammenhang zwischen der Cusp Height und dem arithmetischen Mittenrauwert R_a darzustellen [109].

■ Schichtdatenformate der 2½D Schichtrepräsentation

Die Übernahme der Geometriedaten für die jeweils zu fertigende Schicht erfolgt über eine konturorientierte Schnittstelle. Alle konturorientierten Schnittstellen stellen die durch oben aufgeführte Strategien erzeugten Konturschnitte bereit. Dabei werden neben der äußeren und inneren Konturierung und deren entsprechenden Höhenkoordinaten auch direkt Schraffierungen der Querschnittsflächen hinterlegt. Trotz einiger Entwicklungen von Schichtdatenformaten für die Bereitstellung der Schichtinformationen existiert derzeit kein Standard.

Die Anforderungen an ein flexibles und vor allem anlagenneutrales Datenformat führte im Rahmen eines Brite EuRam (*Basic Research in Industrial Technologies for Europe/European Research on Advanced Materials*) und der Zusammenarbeit führender europäischer Automobilhersteller zu der Entwicklung des CLI-Formates (*Common Layer Interface*) [110]. Die Intention des CLI-Formates ist die Schaffung eines universalen bzw. systemübergreifenden Formates, welches die Konturdaten möglichst simpel, effizient und eindeutig darstellt. Analog zum STL-Datenformat kann eine CLI-Datei sowohl in einer ASCII- als auch in einer Binär-Codierung vorliegen. Innerhalb der 2½D Repräsentation wird die Geometrie durch die Summe von aufsteigenden Schichten beschrieben. Jede Schicht stellt dabei das Volumen zwischen den parallelen Schnittebenen dar und wird durch die Schichtdicke, die Konturdaten und optional die Flächenbelichtungspfade definiert. Gemäß Bild 2-8 a) repräsentiert die Konturlinie die Grenze des Körpers innerhalb der Schicht und wird durch eine Polylinie beschrieben [111]. Diese ist definiert durch eine Reihe von Knotenpunkten ($P_1 - P_{13}$ bzw. $P_{14} - P_{21}$), welche durch gerade Liniensegmente in kontinuierlicher Folge miteinander verbunden sind. Für eine korrekte Interpretation muss jede Kontur in sich geschlossen sein und darf sich nicht selber bzw. andere Konturen schneiden. Eine geschlossene Polylinie wird dabei Polygon genannt und ist in Abhängigkeit von deren Orientierung als innere (mathematisch negativ) und äußere (mathematisch positiv) Konturierung klassifiziert. Alternativ lässt das

CLI-Datenformat die Nutzung von *Hatchlinien* zu. Der Hatch stellt einen Verbund aus unabhängigen geraden Linien dar, welche jeweils durch einen Start- und Endpunkt definiert sind. Hatches bzw. offene Polylinien kommen zum einen für die Belichtungssequenz der Füllstruktur zwischen den Konturen und zum anderen für die Erstellung von *Supportstrukturen* zum Einsatz.

Die Datenstruktur ist unabhängig von der Codierung in einzelne Sektionen unterteilt. Dabei besteht diese mindestens aus einer *Header-* und einer *Geometry-Sektion*, siehe Bild 2-8 b). Weitere Sektionen können je nach Bedarf implementiert werden, sind allerdings optional. Während in ersterer Sektion allgemeine Prozessinformationen (*Codierung, Einheiten, Datum, Anzahl der Schichten, etc.*) definiert werden, sind in der *Geometry-Sektion* alle konturgebenden Polylinien und Hatches der jeweiligen Schicht in sortierter Reihenfolge aufgeführt. Dabei können in einer Ebene prinzipiell beliebig viele Konturen existieren, mindestens aber eine Außenkontur. Der Start der *Header-Sektion* stellt gleichzeitig den Beginn der Datei dar. Analog dazu wird das Ende der *Geometry-Sektion* als Ende der gesamten Datei interpretiert. Alle Daten außerhalb dieser Grenzen werden ignoriert.

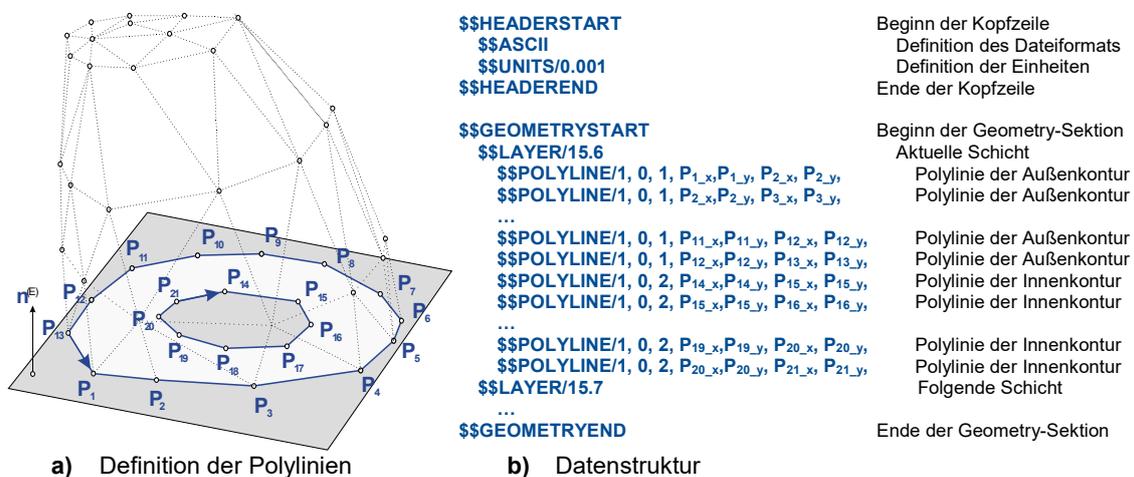


Bild 2-8 - Struktur einer CLI-Datei

Das CLI-Datenformat wird bereits von vielen additiven Fertigungsanlagen unterstützt, nicht zuletzt wegen der Tatsache, dass es sich bei den Datensätzen auf Grund der Nutzung von Polylinien um meist einfache Datensätze handelt und sich schnelle und sichere Möglichkeiten bei der Korrektur fehlerbehafteter Schichtdaten bieten. Der Einsatz der Polylinien geht allerdings zu Lasten der notwendigen Genauigkeit. Auch können die Bauteile ohne erneute Bearbeitung der Original-CAD-Datei nicht mehr skaliert werden, da die Schichtinformationen ohne Bezug zu vorherigen oder folgenden Schichten isoliert sind.

Darüber hinaus existieren neben den offenen Schnittstellenformaten proprietäre Formate der jeweiligen Anlagenhersteller (u. a. *ABF - Arcam Build Files, CLS - Concept Laser Slice Files, SSL - Stratasys Layer File, USF - Universal Slice Files*). Das am weitesten verbreitete Format ist das SLC-Format (*Slicing Contour Format*) der Firma 3D-Systems, welches direkt ohne Abänderungen an die Fertigungsanlage übergeben werden kann [112], [110]. Analog zum CLI-Format handelt es sich hier um eine 2½D Approximation des 3D-CAD-Modells und nutzt Primitive, wie Linien, Polygone und Konturgrenzen, um den Körper in der aktuellen Schicht von der Umgebung zu differenzieren. Zusätzlich werden anlagenspezifische Zusatzinformationen bereitgestellt. Ein Austausch zwischen den additiven Fertigungsanlagen ist in der Regel somit nicht möglich. Alternativ wird der Schichtzerlegungsvorgang, vor allem bei älteren Anlagensystemen, direkt in der Front-End-Software der additiven Fertigungsanlage vorgenommen, so dass der Anwender keinerlei Einblick in den Datenfluss erhält [44].

2.4.4 Erzeugung der Belichtungsbahnen und Parametervergabe

Nach der Schichtdatengenerierung und den dadurch erzeugten geometrischen Schichtinformationen müssen die anlagen- und prozessspezifischen Parameter definiert werden. Die Auswahl einer geeigneten Belichtungsstrategie stellt einen wesentlichen Bestandteil der Prozessvorbereitung dar und wird vom Anwender individuell innerhalb der Anlagensoftware festgelegt. Generell wird hier zwischen der Belichtung der Fläche (Füllbelichtung) eines Volumenelements und der Belichtung der Kontur (Konturbelichtung) unterschieden [18].

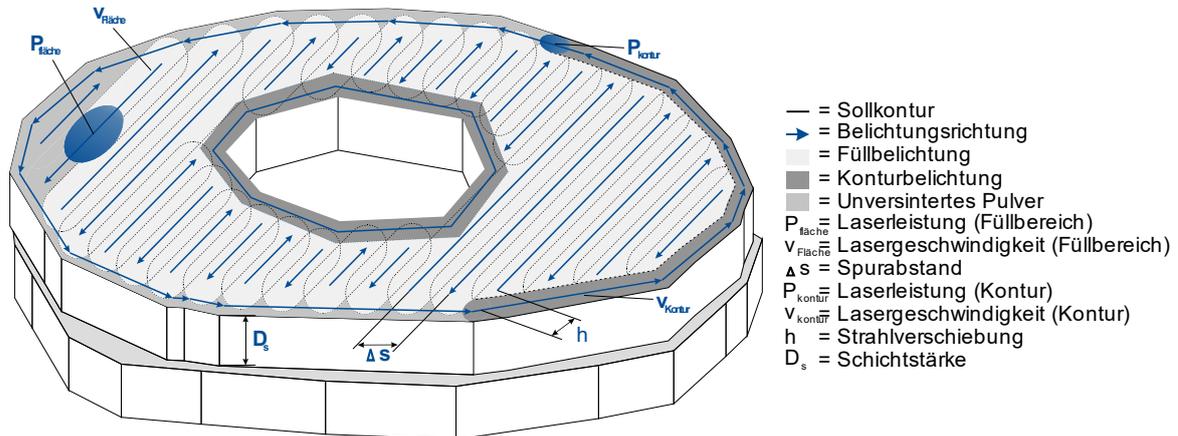


Bild 2-9 - Parametervergabe am Beispiel der Software PSW 3.3

Wie in Bild 2-9 dargestellt, wird die Füllbelichtung durch die Einstellparameter der Laserleistung $P_{\text{Fläche}}$, der Lasergeschwindigkeit $v_{\text{Fläche}}$, sowie dem Abstand zwischen den Scanpfaden und dem Spurabstand Δs bestimmt. Neben den Belichtungsparametern lassen sich zudem die Scanstrategie und damit der zeitliche und geometrische Ablauf des Energieeintrags durch den Laser definieren. Nach aktuellem Stand erfolgt die Füllbelichtung wahlweise entlang der X-Achse mit Vorschub in Y-Richtung bzw. entlang der Y-Achse mit Vorschub in X-Richtung oder alternierend. Mit letzterer Strategie wird entweder jede Schicht sowohl in X- als auch in Y-Richtung doppelt belichtet oder alle in Bauichtung aufeinanderfolgenden Volumenelemente abwechselnd belichtet [113], [114]. Darüber hinaus kann definiert werden, ob die Beschleunigungs- und Abbremsphasen des Laserfokus innerhalb oder außerhalb der Belichtungsbereiche liegen (innerhalb der Prozesssoftware der Firma EOS wird diese Funktion „Skywriting“ genannt) [115].

Der Konturbelichtung fällt die Aufgabe zu, die Randkontur der aktuellen Bauebene zu belichten und somit potentielle Unregelmäßigkeiten zu reduzieren. Neben der Verbesserung der optischen Bauteileigenschaften trägt der Einsatz einer Außenkonturierung durch die Minderung von Kerbstellen aber auch zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bei [113]. Die Konturbelichtung wird durch die Laserleistung P_{Kontur} sowie die Lasergeschwindigkeit v_{Kontur} bestimmt. Durch den Durchmesser des Laserstrahls von 0,3 - 0,5 mm [22] würde die Bauteilgeometrie in der Bauebene bei einem Abfahren der Sollkontur um die Hälfte dieses Betrags bei Innenkonturen zu klein bzw. bei Außenkonturen zu groß sein. Durch die Spurbreitenkompensation (engl. *Beam Offset*) wird daher die Belichtungsbahn der Konturbelichtung um h weg von der Solllinie in die zu belichtende Kontur verlagert. Darüber hinaus werden innerhalb der Prozesssoftware Skalierungsfaktoren definiert, um auftretende Schwindungseffekte zu kompensieren.

Insgesamt kann herausgestellt werden, dass die Vergabe der einstellbaren Belichtungsparameter, mit denen das Bauteil aufgeschmolzen wird, einen außerordentlichen Einfluss auf ausgewählte Produkteigenschaften aufweist. Diese beeinflussen den Laser-Sinterprozess

einzelnen oder in Wechselwirkung bezüglich Wirtschaftlichkeit und Bauteilqualität. Ein detaillierter Stand der Technik über die Einflussfaktoren auf ausgewählte Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile und daraus formulierte Korrelationsmodelle ist in Kapitel 2.7.2 aufgeführt.

2.5 Bauphase

Der Prozess des Laser-Sinterns von teilkristallinen Thermoplasten lässt sich gemäß Bild 2-10 grundsätzlich in die drei Prozessphasen der Vorheiz-, der Bau- und der Abkühlphase untergliedern. Der eigentliche Fertigungsprozess innerhalb der Bauphase besteht aus einer sequentiellen Folge aus der Pulverbereitstellung, dem Pulverauftrag, dem Aufheizen der aktuellen Schicht sowie dem Energieeintrag durch den Laser.

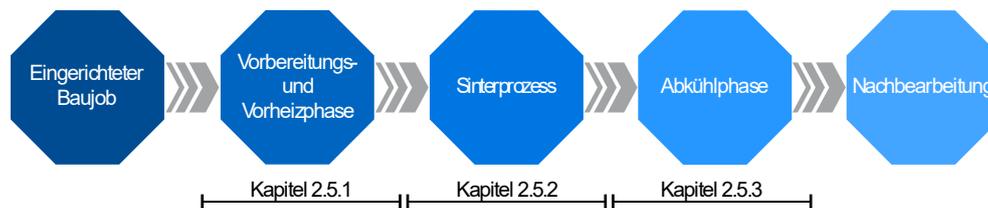


Bild 2-10 - Verfahrensablauf der Bauphase des Laser-Sinterprozesses

2.5.1 Vorbereitung / Vorheizphase

Die in Abschnitt 2.4.4 generierten und mit den Belichtungsparametern verknüpften Schichtinformationen werden zunächst an das Anlagensystem übergeben. Für optimierte Prozessbedingungen wird die Pulverdecke innerhalb der ersten Phase auf wenige Grad unter der Schmelztemperatur für teilkristalline Kunststoffe bzw. der Glasübergangstemperatur für amorphe Kunststoffe vorgeheizt. Zum einen wird somit der erforderliche Energieeintrag zum Aufschmelzen der Pulverpartikel durch den Laser verringert. Zum anderen soll die Entstehung von Schwindungseffekten und damit zusammenhängend eigenspannungsinduziertem Verzug durch die Unterschreitung der Kristallisationstemperatur und der damit resultierenden Kristallisation der bis dahin erzeugten Kunststoffschmelze verhindert werden. Als Konsequenz kann somit auf Stützkonstruktionen verzichtet werden, da die Stützfunktion durch das bauteilumgebende Pulverbett gewährleistet wird. Je nach zu verarbeitendem Werkstoff beläuft sich diese erste Phase zwischen zwei (Standardwerkstoff *PA12*) und vier (*Polypropylen*) Stunden. Zum Aufheizen kommen über den Vorrats- und Baubehältern integrierte thermische Strahler zum Einsatz, welche in ihrer Geometrie und Anordnung für eine Erlangung eines möglichst homogenen Temperaturfeldes ausgelegt sind. Um die Arbeitstemperatur zwischen Kristallisations- und Schmelzbereich konstant zu halten wird diese pyrometrisch gemessen und die Wärmeabfuhr bzw. Wärmezufuhr durch die Heizstrahler mittels PID-Regler gehalten.

Der Prozess wird zudem mit einer dem Werkstoff angepassten Schutzgasatmosphäre, welche einen Restsauerstoffgehalt von 1 - 2 % enthält, durchgeführt. Damit werden unerwünschte Reaktionen der Kunststoffschmelze mit der Umgebungsatmosphäre verhindert und der Staubexplosionsgefahr entgegengewirkt.

2.5.2 Sinterprozess

Der Aufheiz- und Inertisierungsphase folgt die Bauteilbelichtung. Der tatsächliche Sinterprozess gestaltet sich zyklisch nach dem in Bild 2-11 dargestellten Ablauf für jede Belichtungsschicht gleich bis hin zur vollständigen Fertigstellung des Bauprozesses. Der in Bild 2-11 aufgeführte Verfahrensablauf orientiert sich an dem Anlagensystem DTM 2000 der Firma

3D Systems, ist prinzipiell aber auch auf alle weiteren, auf dem Markt befindlichen Systeme zur Bearbeitung teilkristalliner Thermoplaste überführbar.

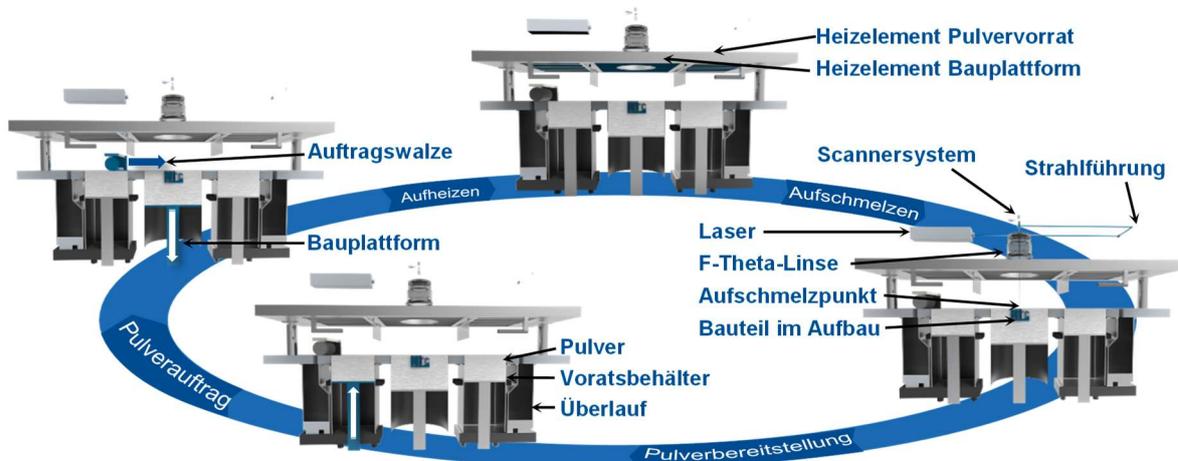


Bild 2-11 - Sinterprozess am Beispiel des Anlagensystems DTM 2000

■ Pulverbereitstellung

Das in Bild 2-11 dargestellte Anlagensystem DTM 2000 nutzt zwei Vorratsbehälter, welche auf beiden Seiten der Bauplattform positioniert sind. Durch ein Spindelhubelement, welches über eine Kupplung mit einem horizontal gelagerten Servomotor verbunden ist, wird der im Pulverbehälter vertikal verfahrbare Boden nach oben bewegt, um ausreichend Pulver für das Auftragssystem bereit zu stellen.

Im Vergleich zu konventionellen Verfahren wie dem Spritzgussverfahren liegt die reine Materialausnutzung innerhalb des Laser-Sinterprozesses bei einem Gewichtsanteil von lediglich 10 - 20 % [116]. Die verbleibenden 80 - 90 % an überschüssigem Material werden nicht für die Fertigung der Bauteile genutzt, unterliegen aber dennoch den allgemeinen Prozessbedingungen. Dabei resultieren die thermischen Langzeitbelastungen und Wechselwirkungen während des Laser-Sinterprozesses in Alterungserscheinungen des Polymerpulvers. Diese äußern sich in Form von chemischen Abbaumechanismen, dem Anstieg der Molmasse und des Kristallinitätsgrades durch Nachkristallisation, der Zunahme der Anzahl von Verschlaufungen durch Nachkondensation sowie der Bildung von Agglomeraten [117].

Untersuchungen zeigen, dass eine erhöhte Alterungsstufe zu einer Erhöhung der Kristallitschmelztemperatur [118], [119], [120] und zum anderen eine Erhöhung der Kristallisationstemperatur [117], [121] zur Folge hat, wobei ersterer Effekt überwiegt. Explizit erhöht sich also zunächst das Verarbeitungsfenster in Abhängigkeit von der zunehmenden Alterungsdauer. Durch die mehrfache Verarbeitung von Altpulver verdoppelt sich durch entstehende Agglomerationen zudem nahezu die mittlere Korngröße und beeinträchtigt somit sowohl das Auftragsverhalten als auch die optischen Oberflächeneigenschaften [22]. Weiter werden mit zunehmendem Pulveralter die Bauteileigenschaften beeinflusst - bemerkbar macht sich der Einfluss in einem Abfall der mechanischen Bauteileigenschaften sowie der Verschlechterung der Oberflächenqualität. Letzteres zeichnet sich primär durch das Auftreten des sogenannten „Orangenhauteffektes“ aus. Genannte Effekte sind stark anlagen-, material- sowie parameterabhängig, wodurch es sehr schwer ist, allgemeingültige Grenzwerte zu ermitteln.

Insgesamt ergibt sich ein empfindlicher Einfluss der Alterungsdauer auf die Materialqualität und damit letztendlich auf die Bauteileigenschaften sowie die Prozessstabilität. Durch die geringe Materialausnutzung arbeitet der Laser-Sinterprozess bei einer reinen Verwendung

von Neupulver nicht wirtschaftlich. Um eine ressourcenschonende Fertigung mit reproduzierbaren Bauteilqualitäten zu gewährleisten, sind die Pulvervorratsbehälter in der Regel mit einem Gemisch aus neuem und rezykliertem Pulver gefüllt. Allgemein orientieren sich die Auffrischraten an den Empfehlungen der Anlagenhersteller. So gibt die Firma EOS für das kommerziell erhältliche Pulver PA 2200 eine Auffrischrate von 30 - 50 % Neupulver vor, die Firma 3D Systems empfiehlt eine Kombination aus jeweils $\frac{1}{3}$ Neupulver, genutztem Pulver und überschüssigem Pulver aus dem Überlaufbehälter [116].

■ Pulverauftrag

Nach der Pulverbereitstellung folgt der eigentliche Auftrag einer dünnen, ebenen und möglichst homogenen Pulverschicht. Dazu wird die Bauplattform um einen definierten Hub (die Schichtdicke D_s) nach unten abgesenkt und das bereitgestellte Pulver durch ein Auftragsystem (im Fall der dargestellten DTM 2000 eine gegenläufig rotierende Walze [122], die Firma EOS verwendet für ihre Anlagensysteme ein Raket [123]) mit einer definierten Geschwindigkeit auf die Bauplattform gefördert. Überschüssiges Pulver wird je nach Anlagensystem in den Überlaufbehältern aufgefangen und kann rezykliert werden.

Ein wichtiges Kriterium für einen homogenen Pulverauftrag unter Erhalt einer glatten Pulverschichtdecke mit möglichst hoher Packungsdichte stellt unter anderem die Schüttgutdichte sowie die Rieselfähigkeit des Pulvers dar [124]. Kommerziell erhältliche Laser-Sinterwerkstoffe, wie beispielsweise PA 2200, zeichnen sich auf Grund seiner annähernd runden Partikelform durch eine gute Rieselfähigkeit aus [124]. Durch die Mischung unterschiedlicher Partikelgrößen (bei PA 2200 liegt die Größenverteilung bei 58 μm sowie einem Feinanteil von 10 μm) wird zudem die Porosität des Pulverbettes beträchtlich verringert [125]. Eine hohe Schüttgutdichte begünstigt dabei Dichte, Maßhaltigkeit und mechanische Festigkeitseigenschaften des gefertigten Bauteils. Beide Größen werden maßgeblich von den geometrischen Merkmalen des Pulvers wie der Partikelgröße, der Partikelgrößenverteilung oder Partikelform, sowie dem eigentlichen Material, dessen Herstellungsverfahren sowie der Nutzung von Additiven beeinflusst [15].

■ Aufheizen

Für eine optimale Verarbeitung des Werkstoffes ist es zwingend notwendig, die Prozess-temperatur möglichst konstant zwischen der Kristallisations- und der Kristallitschmelztemperatur zu halten. Nach dem Energieeintrag des Lasers und der daraus entstandenen Schmelzeausbildung kommt es durch die erneute Pulverbereitstellung zu unerwünschten Abkühlvorgängen.

Dieser unter Umständen resultierende hohe Temperaturgradient begünstigt gerade bei großen Bauteilen die Ausbildung von Verzug. Das Phänomen des Verzugs lässt sich grundsätzlich auf zwei Ursachen zurückführen. Dieser ist zum einen zu beobachten, wenn eine Schicht direkt nach dem Sintern ein ungleichmäßiges Temperaturprofil in vertikaler Richtung aufweist. Kühlt diese Schicht dann auf die Temperatur des Pulverbettes ab, ziehen sich die einzelnen Partikel der Schicht unterschiedlich stark zusammen. Durch entstehende Spannungen resultieren charakteristische Auswölbungen an den Rändern, verbunden mit qualitativen Beeinträchtigungen des mechanischen Verhaltens. Zum anderen lässt sich eine Ursache für die Verzugserscheinung in Volumenschwindungen der belichteten Bauteilschichten finden. [23]

Da sich das spezifische Volumen im Bereich der Kristallisationstemperatur bei teilkristallinen Thermoplasten auf Grund molekularer Wechselwirkungen stark verringert [24], ist es wichtig, das neu aufgetragene Pulver schnell über die Kristallisationstemperatur zu erwärmen.

Dadurch soll verhindert werden, dass der aufgeschmolzene Werkstoff als Folge des Erstarungsvorgangs und der erneuten Kristallisation einen nicht linearen Schwund erfährt [25]. Auf Grund der schlechten Wärmeleitung der luftdurchsetzten Partikelschicht kann der Vorgang des Aufheizens durchaus einige Sekunden dauern.

Bei zu hohen Bauraumtemperaturen, d. h. der Überschreitung der Kristallitschmelztemperatur, kann es wiederum auch bei Partikeln außerhalb des Belichtungsbereiches zu Aufschmelzerscheinungen kommen, mit dem Effekt, dass so entstandene Agglomerate beim nächsten Beschichtungsvorgang durch das Beschichtersystem über die Arbeitsoberfläche gezogen werden und unter Umständen für einen Bauprozessabbruch verantwortlich sind.

Aus diesen Gründen kommt der Temperierung der Baukammer eine besondere Bedeutung zu, da diese einen signifikanten Einfluss auf die generelle Verarbeitbarkeit sowie die resultierenden Bauteileigenschaften ausübt. Unkontrollierte Phasenübergänge von Schmelze und Pulver müssen hierbei zwingend vermieden werden. Durch den Einsatz von Deckenstrahlern, einem Zylinderheizer sowie von Infrarot-Heizstrahlern sollen während des Neuauftrags des Pulvers sowohl zu hohe Temperaturen, welche in einem unkontrollierten Aufschmelzen des Pulvers resultieren würden, als auch eine Unterkühlung der Schmelze mit dem Effekt einer beginnenden Kristallisation verhindert werden. Zusätzlich wird die Wärme aus den aufgeschmolzenen Bereichen durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des umliegenden Pulvers langsamer abgeführt.

■ Laserbearbeitung

Der eigentliche Verfestigungsmechanismus entspringt thermischen Ursprungs und erfolgt nach Erreichen der Prozesstemperatur durch die Vorheizung der aktuell vorliegenden Pulverschicht über aufgebrachtener Wärmestrahlung eines fokussierten Lasers. Die Fokussierung übernimmt dabei eine Planfeldlinse, wobei ein Dual-Fokus-Modul, das eine Änderung des Strahldurchmessers während des Bauprozesses erlaubt, ebenfalls möglich ist [1]. Nach heutigem Stand der Technik wird das schichtweise aufgetragene Pulver durch einen CO₂-Laser bei einer emittierten Laser-Wellenlänge von $\lambda_{\text{Laser}} = 10,6 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Energiemenge bis zu einer definierten Tiefe selektiv an- oder aufgeschmolzen und mit der darunter liegenden Schmelzeschicht fest verbunden. Bei dieser charakteristischen Wellenlänge weisen Kunststoffe auf Grund der in diesem Bereich hohen Gerüst- und Gruppenschwingungen einen Absorptionsgrad bis zu 95 - 98 % auf [126], [127]. Der in der Sinterstation DTM 2000 eingesetzte Laser ist ein wassergekühlter Laser des Typs Synrad 48-5 (Wellenlänge: 10,57 - 10,63 μm , Leistung: 50 W, Leistungsstabilität: $\pm 5 \text{ W}$, Strahldurchmesser: 3,5 μm , Strahldivergenz: 4 mrad, Pulsrate: bis 5 kHz [22]).

Die Füllbelichtung innerhalb der aktuellen Schicht dient der Erzeugung der Schichtgeometrie und liefert die notwendige Energie zum Aufschmelzen des Pulvers. Dabei ist der Energieeintrag des Lasers durch seine Leistung $P_{\text{Fläche}}$ sowie die Lasergeschwindigkeit $v_{\text{Fläche}}$ bestimmt und lässt sich nach Formel 2-9 beschreiben. Das knapp unter die Kristallitschmelztemperatur vorgeheizte umliegende Pulver stützt das zeitweise schmelzeförmig vorliegende Bauteil.

$$E_S = \frac{P_{\text{Fläche}}}{v_{\text{Fläche}}}$$

Formel 2-9

Durch die Überlappung der einzelnen Belichtungslinien mit dem Spurbabstand Δs erfolgt die mehrfache Belichtung der Pulverpartikel und damit die Verbindung der Belichtungsbahnen innerhalb der Schicht. Nelson führt in diesem Kontext die Flächenenergiedichte E_A ein und definiert diese nach Formel 2-10 als Verhältnis aus der Laserleistung $P_{\text{Fläche}}$, der Scangeeschwindigkeit $v_{\text{Fläche}}$ und dem Spurbabstand Δs [128].

$$E_A = \frac{P_{Fläche}}{v_{Fläche} \times \Delta S}$$

Formel 2-10

Mit der Einbeziehung der Schichtdicke D_s wurden oben genannte Formeln zur Volumenenergiedichte E_v innerhalb der Arbeiten von Meiners [129] und später Kaddar [113] erweitert:

$$E_V = \frac{P_{Fläche}}{v_{Fläche} \times \Delta S \times D_s}$$

Formel 2-11

Bei der additiven Fertigung durch den Laser-Sinterprozess ist die vollständige Schichtanbindung durch ein homogenes Schmelzbad zwingend erforderlich. Die Einkopplung der Energie des Laserstrahls zum Aufschmelzen des Werkstoffs beruht hierbei grundsätzlich auf der Wechselwirkung von drei Anteilen: Ein Teil von etwa 5 - 10 % wird an den Oberflächen des Werkstoffes reflektiert (*Reflexionsgrad R*) und steht dem gezielten Aufschmelzen nicht zur Verfügung. Weiter wird ein Teil durch Anregung von Dipolschwingungen der Molekülketten im Werkstoff absorbiert (*Absorptionsgrad A*). Dabei ist die Anregung von Schwingungen durch Strahlungsabsorption zum einen vom Aggregatzustand und zum anderen von der Temperatur des Mediums abhängig. Wird beim Durchgang der Energie durch das Medium selbige nicht vollständig absorbiert, so wird ferner ein Teil des Lichts transmittiert, gelangt also (un)gerichtet durch das Medium hindurch (*Transmissionsgrad T*). Die Gewichtung aller drei Anteile wird sowohl durch die Eigenschaften der einfallenden Strahlung wie der Laserwellenlänge, dem Einfallswinkel oder dessen Polarisation, als auch durch das Medium, das heißt der Zusammensetzung, der Oberflächenmorphologie oder der Dicke des Mediums, bestimmt. [127]

Die eingebrachte Energie des Lasers dient hierbei lediglich dazu, genügend Schmelzeenthalpie zuzuführen, um das vorgeheizte Pulver in den schmelzförmigen Zustand zu überführen, ohne die Temperatur dabei signifikant zu erhöhen [23]. Nach Einbringung der Energie breitet sich diese zunehmend durch die Wärmetransportmechanismen Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung in der Pulverschicht aus. Nach Alscher [23] können die Transportmechanismen aufgeteilt werden in eine Wärmeleitung im Feststoff, durch Berührungsstellen zwischen den Oberflächen, zwischen benachbarten Lücken durch das Gas, weiter durch die Schmelze in der Partikelkontaktfläche sowie durch Konvektion über und innerhalb der Schmelze. Dabei verhindert die geringe Wärmeleitfähigkeit des Pulvers eine schnelle Wärmeabfuhr aus dem aufgeschmolzenen Pulver. Zusätzlich wird die Wärmeabfuhr aus dem Anlagensystem durch die Beheizung der Bauplattform und der Baubehälter begrenzt. Bei der Betrachtung einer optimalen Energiebilanzierung während des Bauprozesses sollte das Verhältnis zwischen den Eingangs- und Verlustströmen immer ausgeglichen sein [15]. Lediglich bei der punktuellen Einbringung der Energie durch den Laser ist ein Temperaturgradient zulässig.

2.5.3 Abkühlphase

Die Teilprozessschritte Pulverbereitstellung, Pulverauftrag, Aufheizen und Energieeinkopplung durch den Laser werden so lange wiederholt, bis alle Schichten zur Fertigung der im Bauprozess enthaltenen Bauteile abgeschlossen sind. Um eine homogene Abkühlung zu gewährleisten, werden nach Beenden der letzten Schicht weitere Schichten aufgetragen, welche nicht durch den Laser bearbeitet werden, um die Bauteile von allen Seiten mit einer Isolationsschicht aus unversintertem Pulver zu umgeben. Erst danach werden die Heizelemente der Anlage ausgeschaltet. Innerhalb des Abkühlprozesses kühlt der Baubehälter von außen nach innen sowie von unten nach oben ab. Durch den als Isolationsschicht fungierenden Pulvermantel wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Abkühlung und damit

das Kristallisationsverhalten ausreichend homogen verläuft [130]. Zahlreiche Untersuchungen zeigen allerdings ein positionsabhängiges Abkühl- und Erstarrungsverhalten, auch hervorgerufen durch eine inhomogene Temperaturverteilung der Pulverbetttoberfläche, welches sich mit zunehmender Tiefe nicht ausgleicht. Als Konsequenz ist ein positionsabhängiges Schrumpfverhalten zu beobachten, was sich vor allen bei großen, flächigen Bauteilen in Form von Verzug bemerkbar macht [76], [131].

Eine verfrühte Entnahme bei zu hoher Bauraumtemperatur kann zu reduzierten Bauteileigenschaften führen. Zur Gewährleistung optimaler Bauteileigenschaften gilt der Abkühlprozess erst als abgeschlossen, sobald die Pulvertemperatur im Baurauminneren unter eine Temperatur von 42 °C abgekühlt ist [132]. Hieraus resultieren in der Regel Abkühlzeiten, welche in etwa der Zeit der Aufheiz- und tatsächlichen Bauphase entsprechen [133].

2.6 Nachbearbeitung lasergesinterter Bauteile

Nach Beendigung der Abkühlphase und damit des Bauprozesses befinden sich die gefertigten Bauteile eingeschlossen innerhalb eines Pulverkuchens. Bevor die Bauteile zum Einsatz kommen können, müssen diese innerhalb des in Bild 2-12 gezeigten Nachbearbeitungsprozesses aufbereitet werden. Dabei werden die Prozessschritte innerhalb der Arbeit in die zwingend notwendige Nachbearbeitung und die optionale Nachbearbeitung unterteilt. Letztere dient der gezielten Verbesserung ausgewählter Qualitätsmerkmale.

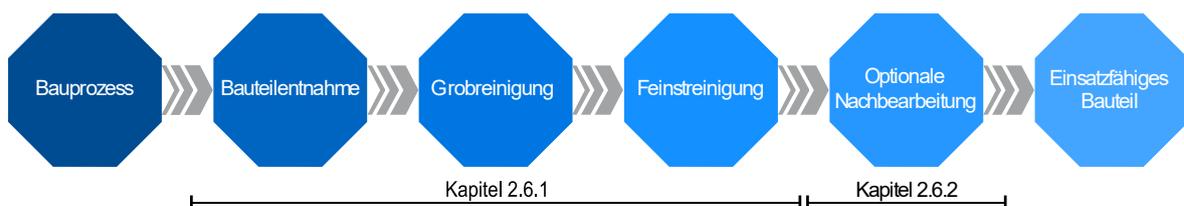


Bild 2-12 - Nachbearbeitungsschritte lasergesinterter Bauteile

2.6.1 Notwendige Nachbearbeitungsschritte

Die notwendige Nachbearbeitung beinhaltet eben jene Prozessschritte, welche für den Einsatz der gefertigten Bauteile erforderlich sind. Dazu zählt zunächst die Bauteilentnahme aus dem Pulverkuchen sowie die Grobreinigung mit entsprechendem Werkzeug - in der Regel innerhalb einer Auspackstation, welche nicht genutztes Pulver separat auffängt und für den Wiederaufbereitungsprozess sammelt. Danach werden die Bauteile in einem weiteren Prozessschritt einer Feinstreinigung unterzogen. Hier kommt oftmals das Strahlverfahren in Kombination mit Glasperlen als Strahlgut zum Einsatz, in dem die Bauteiloberfläche lediglich von den letzten Pulverresten befreit wird, ohne diese je nach eingestelltem Strahldruck abrasiv zu bearbeiten.

2.6.2 Optionale Nachbearbeitungsverfahren

In der Fertigung von Modellen und Prototypen haben sich die additiven Fertigungsverfahren in ihrer Ausprägung des *Rapid Prototyping* bereits auf dem Markt etabliert. Damit sich diese in Zukunft im Bereich des *Rapid Manufacturing* - also der Fertigung von End- und Serienteilen - etablieren können, müssen sie in ihren Bauteileigenschaften mit den konventionellen Fertigungsverfahren, in denen die Formteile meistens ohne weitere Bearbeitung sofort nutzbar sind, mindestens konkurrieren können. Dieser Trend setzt allerdings auch die Überwindung definierter Anforderungen, etwa die Sicherung und Optimierung des Eigenschaftsprofils sowie deren Reproduzierbarkeit voraus. Durch eine angepasste Prozessführung sowie

optimierter Belichtungsstrategie können beispielsweise die für die Oberflächenbeschaffenheit verantwortlichen Effekte minimiert, allerdings nicht vollständig eliminiert werden, siehe Kapitel 2.7. Im Resultat ist die Bauteiloberfläche eines lasergesinterten Bauteiles, dargestellt in Bild 2-13, durch folgende prozessspezifische Erscheinungen gekennzeichnet:

a) Treppenstufeneffekt

Durch den verfahrensbedingten schichtweisen Aufbau ist jede in Baufortschrittsrichtung gefertigte Bauteiloberfläche in Abhängigkeit von dessen Orientierung vom *Treppenstufeneffekt* gekennzeichnet. Das Herabsetzen der Schichtdicke D_s mindert zwar den Effekt, wird allerdings durch die Korngrößenfraktion des Ausgangsmaterials begrenzt und wirkt sich negativ auf die Bauzeit und damit letztendlich auf die Wirtschaftlichkeit aus.

b) Pulverpartikelanhaftung

Ein erhöhter Energieeintrag des Lasers ist für das unkontrollierte Wachsen der Geometrie durch Wärmeleitungseffekte in den Randbereichen verantwortlich. Pulverpartikel nahe der Bauteilkontur schmelzen somit auch bei einer geringen Wärmestrahlung an und verkleben mit der eigentlichen Bauteiloberfläche. Eine Grundverfestigung der Partikel in den unbelichteten Bereichen lässt sich auf Seiten des Werkstoffs zum einen durch eine möglichst große Differenz der Oberflächenenergie zwischen festem Polymer zur Oberflächenspannung der Schmelze, zum anderen durch eine möglichst steile Aufschmelzkurve ab der extrapolierten Anfangstemperatur des endothermen Peaks $T_{ei,m}$ verringern [23]. Eine prozesseitige Reduzierung der Energieeinbringung ist für die Verbesserung der geometrischen Bauteileigenschaften dabei nur so lange sinnvoll, wie die Dichte und damit korrelierenden mechanischen Bauteileigenschaften garantiert werden können.

c) Unvollständig gesinterte Pulverpartikel

Die minimal erreichbare Oberflächengüte wird durch die geometrischen Merkmale wie die Pulvergröße, die Partikelgrößenverteilung sowie die Partikelform des Ausgangspulvers limitiert. So lassen sich prinzipiell mit sphärischen Partikeln geringere Oberflächen erreichen. Durch eine breite Partikelgrößenverteilung sowie einem definierten Anteil von Feinstpartikeln werden Hohlräume zwischen den großen Partikeln durch kleinere besetzt. Die volumemäßig kleineren Partikel benötigen dabei innerhalb des Energieeintrags eine geringere Energiemenge zum vollständigen Aufschmelzen als im Verhältnis größere Partikel. In Abhängigkeit von deren Größe sind während der Laserbelichtung somit Partikel in angeschmolzener, vollständig geschmolzener als auch zersetzter Form zu beobachten. Durch die Verarbeitung von Altpulver entstandene Agglomerate verstärken den genannten Effekt.

d) Orangenhauteffekt

Die wiederholte Nutzung des Materials resultiert sowohl in einem Abfall der mechanischen als auch der optischen Eigenschaften. Insbesondere verursacht ein zu hoher Anteil von Altpulver in Abhängigkeit von dessen Alterungsgrad Einfallstellen an den äußeren Bauteilwänden, die auch *Orangenhaut* genannt werden. Durch Auffrischen mit Neupulver kann diesem Effekt entgegengewirkt werden.

e) Schichteffekt

Durch die Möglichkeit Bauteile über- bzw. ineinander zu verschachteln handelt es sich bei

der Einrichtung des Laser-Sinterprozesses um ein komplexes dreidimensionales Packungsproblem. Damit ergeben sich in der Regel unterschiedliche Belichtungsflächen und damit auch unterschiedliche Belichtungszeiten für jede Schicht. Durch die daraus resultierenden unterschiedlichen Verweilzeiten kühlen die einzelnen Schichten in individueller Länge ab und zeigen demnach ein inhomogenes Verzugsverhalten. Visuell sichtbar werden die variierenden Schichtzeiten durch Versätze der Bauteilkontur.

f) STL-Formatierung

Musste bis vor ein paar Jahren noch eine Abwägung zwischen großen Datenmengen und vertretbarem Rechenaufwand vorgenommen werden, kann die CAD-Datei heute auf Grund ausreichender Rechenkapazitäten in feinste Auflösung approximiert werden. Daher hat die Qualität der STL-Formatierung eine eher untergeordnete Rolle, soll der Vollständigkeit halber an dieser Stelle jedoch mit aufgeführt werden.

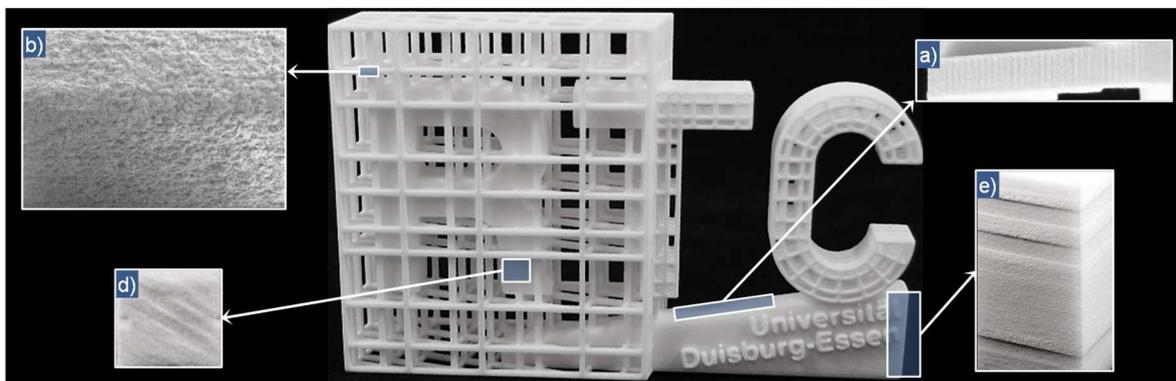


Bild 2-13 - Oberflächenbeschaffenheit lasergesinterter Bauteile

Um den Einsatzbereich additiv gefertigter Bauteile sicherzustellen bzw. zu erweitern, ist der Einsatz von Nachbearbeitungsverfahren aus der Oberflächentechnik unumgänglich.

Die Nachbearbeitungsansprüche sind hier unterschiedlicher Natur. So wird allgemein zwischen dekorativen und funktionellen Eigenschaften der Oberfläche unterschieden. Erstere sind Eigenschaften wie *Glanz, Farbe, Deckvermögen, Rauheit* und *Einebnung* unterzuordnen. Die funktionellen Anforderungen fassen die Eigenschaften *Korrosionsbeständigkeit, Verschleißbeständigkeit, Gleiteigenschaften, Rauheit, Härte, Festigkeit, Dichte* und *Leitfähigkeit* zusammen [134]. Oft werden die Anforderungen in kombinierter Form an die additiv gefertigten Bauteile gestellt. Die hieraus resultierenden Anforderungsprofile können verfahrensbedingt oftmals nicht erfüllt werden. Die Auswahl eines geeigneten Nachbearbeitungsverfahrens ist dabei neben den Faktoren *Zeit, Kosten* und der *Erfüllung der gewünschten Anforderung* maßgeblich durch die *Bearbeitungsmöglichkeit von komplexen Bauteilstrukturen* definiert. Zahlreiche wissenschaftliche Beiträge beschäftigen sich mit der Qualifizierung potentieller Nachbearbeitungsverfahren für lasergesinterter Bauteile. Im Folgenden werden allerdings nur jene vorgestellt, welche sich mit der gezielten Verbesserung der *Oberflächenrauheit* befassen haben.

Breuninger klassifiziert das Strahlverfahren als einziges mögliches Verfahren zur großflächigen Bearbeitung komplexer Geometrien [13]. Untersucht wurden metallische, mineralische und organische Strahlmittel in verschiedenen Größen unter ansonsten konstanten Bearbeitungsbedingungen. Breuninger kommt zum Ergebnis, dass seine Versuchsproben aus Polyamid 12 eine maximale Verbesserung von bis zu 90 % unter Verwendung des Strahlmittels *Korund* erfahren haben. Auch Bohnet erreicht ähnliche Resultate unter der Verwendung von *Normalkorund, Kunststoffgranulat* sowie *Glasperlen*. Dabei stellt er den Einfluss

der Korngröße auf die minimal erreichbare Oberflächenrauheit als herausragend dar [135]. Kaddar variiert in seinen Versuchen Material und Härte des Strahlguts, sowie Geschwindigkeit, Abstand, Winkel und Bearbeitungsdauer und kommt zu dem Schluss, dass auf Grund der doch zu geringen Verbesserungen und vor allem streuenden Ergebnisse dieses Verfahrens nicht als Hauptbearbeitungsverfahren dient, sondern lediglich als Vorbereitungsschritt anzusehen ist [113].

Ein größeres Potential sieht Kaddar hingegen in der Nachbearbeitung durch das Gleitschleifen. Dabei erfolgt der maßgebliche abrasive Abtrag und die damit verbundene Oberflächenveredlung innerhalb der ersten Bearbeitungsstunde. Darüber hinaus wird die Güte der erreichbaren Oberflächenqualität primär von der Schleifkörpergeometrie beeinflusst. Im Ergebnis konnte die Oberflächengüte in Abhängigkeit von der Zugänglichkeit der Flächen maßgeblich verbessert werden. Ähnliche Oberflächenoptimierungen erreicht auch Schmid durch den Einsatz von Keramiksleifkörpern (Typ *RXX 03/10 Z* der Firma Rösler) [136]. Da der Materialabtrag auf Grund der Zugänglichkeit der Flächen und damit auch die Oberflächengüte variiert und die Bearbeitung eine Kantenabrundung zur Folge hat, wird von beiden lediglich der partielle Einsatz des Verfahrens empfohlen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Rauheit lasergesinteter Bauteiloberflächen stellt das Eintauchen in ein Wirkmedium dar. Bohnet mindert die Oberflächenrauheit in Abhängigkeit vom eingesetzten Wirkmedium, der Bearbeitungstemperatur und -dauer von PA 12-Bauteilen um bis zu 70 % [137]. Im Bereich der Oberflächenveredlung additiv gefertigter Bauteile wird das Ätzverfahren besonders bei der Nachbearbeitung von FLM (*Fused Layer Modeling*)-Bauteilen aus ABS untersucht. So erreicht Galantucci durch die Behandlung eines Aceton-Wasser-Gemischs (Verhältnis 9:1) Verbesserungen der Oberflächengüte um bis zu 80 % bei gleichzeitig leichtem Abfall der Zugfestigkeit sowie Zunahme der Dehnung [138], [139]. Aufbauend auf genannte Erkenntnisse weitet Rao die Versuche in Form einer statistischen Versuchsplanung auf den Einsatz verschiedener Chemikalien in variierenden Konzentrationen, Bearbeitungstemperaturen und -zeiten aus [140]. Darüber hinaus existiert eine Reihe von Kickstarter-Projekten, welche sich mit der Nachbearbeitung von FDM-Bauteilen durch Aceton-Dampf auseinander setzen.

Ferner ist es neben abtragenden Verfahrenstechniken möglich, Kunststoffbauteile funktionsell zu beschichten. Mit Fokus auf lasergesinterte Bauteile untersucht Schmid das Tauchen in ausgewählte flüssige Beschichtungsmaterialien (eng. *dip coating*), um im Ergebnis die Wasserdurchlässigkeit amorpher Kunststoffe zu reduzieren [136], [141]. Bohnet betrachtet eine Verfahrenskombination, in der zunächst durch den *Physical Vapour Deposition*-Prozess (*PVD*) eine elektrisch leitfähige Schicht erzeugt wird und diese in einem folgenden Schritt galvanisch beschichtet wird [137]. In diesem Kontext nennt Breuninger zudem das *Chemical Vapour Deposition* Verfahren (*CVD*), bei dem die Schicht durch eine chemische Reaktion an der Oberfläche entsteht [13]. Beschichtungsverfahren, wie das Einfärben, Lackieren oder Beschichten, zielen neben der Erfüllung der technischen Ansprüche (z. B. die Verbesserung der mechanischen und korrosiven Eigenschaften des Bauteils) maßgeblich darauf ab, das optische Erscheinungsbild zu verändern. Nach Kaddar sind diese aber auf Grund der stark variierenden Ausgangszustände lasergesinteter Bauteiloberflächen nur sehr eingeschränkt zur gezielten Verbesserung der Oberflächengüte nutzbar [113].

2.7 Qualitätssicherung lasergesinteter Bauteile

Angesichts des physikalischen Grundprinzips des Fertigungsprozesses unterscheiden sich lasergesinterte Bauteile in ihren Eigenschaften grundlegend von Bauteilen bereits bekannter Verfahren, wie beispielsweise dem Spritzguss. So werden lasergesinterte Bauteile, wie

bereits in Kapitel 2.5 erläutert, durch das zyklische Aufschmelzen von Pulverschichten erzeugt. Dabei bilden die Schichten ein charakteristisches Profil aus, dessen Struktur sich auf die Gauß'sche Verteilung des Lasers, das Fließverhalten der Kunststoffschmelze, die Eindringtiefe des Lasers und die thermischen Bedingungen bei der Erstarrung zurückführen lassen.

Von essentieller Bedeutung ist daher die effektive und wirtschaftliche Qualitätssicherung lasergesinterter Bauteile, nicht zuletzt im Hinblick auf den Anspruch zukünftiger Kleinserienproduktionen oder den der „*mass customization*“ [142] (Rapid Manufacturing). Die notwendigen Schritte können in Analogie zum Pre-, Bau- und Postprozess in *präventive*, *direkte* und *ergebnisorientierte* Maßnahmen zur Qualitätssicherung unterschieden werden. Da die *direkte* Qualitätssicherung, welche Maßnahmen zur Prozessüberwachung mittels maschineninterner und/ oder sensorielle Messsignale beinhaltet, nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit sein soll, werden im Folgenden lediglich die *präventiven* und *ergebnisorientierten* Möglichkeiten der Qualitätssicherung innerhalb des Laser-Sinterns thematisiert.

2.7.1 Präventive Prozess- und Bauteilstrukturmodellierung durch die Finite-Elemente-Methode

Die Erzeugnismerkmale lasergesinterter Bauteile sind, besonders mit dem Anspruch den Weg zur Serienproduktion zu bestreiten, nicht mehr allein auf die optischen Bauteileigenschaften beschränkt. Die Sicherstellung elementarer Materialeigenschaften wie etwa die Dichte oder Festigkeitswerte ist in diesem Kontext in besonderem Maße in Betracht zu ziehen. Bislang existieren hier keine einheitlichen Ansätze oder Vorgehensweisen, welche entsprechende Qualitätsmodelle nutzen. Im Gegensatz zum Qualitätsmanagement von Bauteilen konventioneller Fertigungsverfahren liegt das Einsatzgebiet additiver Fertigungsverfahren bei Kleinserien bzw. bei einer Stückzahl von eins. Zerstörende Prüfverfahren kommen als Folge für Qualitätsnachweise daher nicht in Frage.

Eine in den letzten Jahren etablierte Methode zur Vorhersage des Bauteilverhaltens stellt die Simulation dar [143]. Numerische Berechnungen auf Basis finiter Elemente bieten hier die Möglichkeit das Eigenschaftsprofil, genauer das Verhalten im Kurzzeitbereich und das Langzeitverhalten thermoplastischer Bauteile, vorauszusagen. In Bezug auf den Laser-Sinterprozess kann nach folgendem Kapitel 2.7.2 angenommen werden, dass die richtungsabhängigen Materialeigenschaften maßgeblich prozess- und nicht werkstoffabhängig sind. Folglich sind die Materialeigenschaften von Laser-Sinterwerkstoffen, zumindest qualitativ, weitestgehend mit den richtungsabhängigen Materialeigenschaften von PA 12 vergleichbar und unterscheiden sich lediglich in dessen absoluten Kennwerten. Unter dieser Annahme fokussieren sich folgende Ausführungen zur Analyse und Klassifizierung des allgemeinen richtungsabhängigen Werkstoffverhaltens und dessen simulationsgestützter Beschreibung maßgeblich auf Publikationen über den Werkstoff Polyamid. Dabei beschränken sich deren Erläuterungen meist lediglich auf die Beschreibung des Aufschmelzverhaltens der pulverbettbasierten Verfahren. Folglich dienen diese mehr der Prozessanalyse als dem Festigkeitsnachweis des Bauteiles.

Erste eindimensionale Beschreibungsversuche mit der *Finite-Elemente-Methode* (FEM) des Laser-Sinterprozesses wurden 1991 von Weissmann unternommen. Dieser greift in [144] die Analysen nach Scherer, Mackenzie und Shuttleworth, welche sich allesamt mit dem Sinterverfahren auseinander gesetzt haben, auf und beschreibt das Aufschmelzverhalten einer Sinterlinie für den Thermoplasten ABS. Weiter hat Franco das thermische Aufschmelzverhalten des Polyamidpulvers Duraform unter energetischer Sicht betrachtet, indem der Einfluss variierender Energiedichten auf die Tiefe und Breite der generierten Sinterlinien untersucht wurde [145]. Gute Übereinstimmungen mit den vollzogenen experimentellen

Versuchen konnten nachgewiesen werden. Weitere eindimensionale Ansätze werden unter anderem in [146] und [147] diskutiert.

Unter der Annahme, dass ein eindimensionales Modell die Randbereiche, in denen beim Laser-Sintern die höchsten Temperaturgradienten existieren, nicht genau abbildet, wurden zweidimensionale Modelle unter anderem von [148], [149] und [150] erstellt. Bai [151] simuliert in diesem Zusammenhang das Aufschmelzverhalten von polymerbeschichtetem Molybdän, wobei sich die Dichte und die Wärmeeinbringung beider Verbundmaterialien linear zueinander verhalten und während des Prozesses als konstant angenommen werden. In [152] wird das Aufschmelzverhalten von Polycarbonat durch die Finite Differenzen und Finite-Elemente-Methode beschrieben. Innovativer Ansatz ist hier die Berücksichtigung der nicht-linearen thermischen Eigenschaften des Polymers, welche durch eine Dichtezunahme während des Aufschmelzvorgangs hervorgerufen werden. Die theoretische Voraussage deckt sich weitestgehend mit den experimentell erfassten Größen.

Das zuvor entwickelte Modell wurde von Childs in ein dreidimensionales Modell überführt, um das Aufschmelzverhalten kristalliner Polymere abbilden zu können [153]. Hierzu wurden insgesamt drei Anpassungen realisiert: Der Umgang mit der latenten Schmelzwärme, die Modifikation der Viskosität, um den kristallinen Anteil in der Schmelze abbilden zu können und schließlich die Anpassung der Energieeinbringung des CO₂-Lasers in eine definierte Tiefe des Materials. Ebenfalls wurden die thermischen Vorgänge und das Sinterverhalten von Polycarbonat in [154] betrachtet, wobei eine lineare Abhängigkeit zwischen Energieeintrag des Lasers und maximaler Pulverbetttemperatur nachgewiesen werden konnte. Liu und Zhang [155] beschreiben auf mikroskopischer Ebene das Aufschmelzverhalten innerhalb des porös angenommenen Pulverbetts. Die Pulverpartikel werden hier durch kubische Geometrie angenähert. Die Porosität wird durch eine uniforme, in sich versetzte Pulverbettgeometrie beschrieben. Insgesamt konnten hier weiträumige Übereinstimmungen mit den experimentellen Versuchen gefunden werden. Die Temperaturentwicklung beim Laser-Strahlschmelzprozess, also der Verarbeitung von metallischen Pulvern, wurde innerhalb eines dreidimensionalen Modells unter anderem von Kollosov entwickelt [156].

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass sich die simulationsbasierten Untersuchungen im additiven Bereich auf die Beschreibung des jeweiligen Fertigungsprozesses beschränken. Untersuchungen zur FEM-gestützten Bauteilauslegung in diesem Bereich sind bislang in unzureichender Form verfügbar.

Einen ersten Ansatz zur FEM-gestützten Bauteilauslegung innerhalb des Laser-Sinterns präsentiert Ajoku [157]. Die Finite-Elemente-Methode wird hier genutzt, um die Auswirkung und Verteilung von Poren in einem lasergesinterten Bauteil auf die Festigkeitskennwerte zu simulieren. Dabei wird die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften jedoch nicht implementiert. Das Materialmodell ist also inhomogen und isotrop. Weiter verwendet Eshraghi die Finite-Elemente-Methode, um das Mischungsverhältnis von verschiedenen Werkstoffen in vom Körper abbaubaren Implantaten und dessen Auswirkungen auf definierte Werkstoffkennwerte zu ermitteln. Eine Orientierung im Bauraum wird auch hier nicht beachtet [158]. Weiter hat Soe ein Werkstoffmodell für den elastischen Werkstoff Duraform Flex erstellt [159]. Die durchgeführten Werkstoffversuche zeigen ein richtungsabhängiges Verhalten, das als orthotrop klassifiziert wird. Dabei zeigt sich, dass die Werte innerhalb der Bauebene identisch sind. Eine genauere Klassifizierung des orthotropen Materialverhaltens auf Grund dieser Erkenntnis findet jedoch nicht statt. Obwohl das richtungsabhängige Verhalten von diesem Laser-Sinterwerkstoff bekannt ist, wurde es nicht in die Simulation integriert.

2.7.2 Ergebnisorientierte Sicherung der Bauteileigenschaften

Ergebnisorientierte Maßnahmen der Qualitätssicherung sind prinzipiell produktorientiert ausgelegt und beinhalten die Prüfung qualitätsrelevanter Kenngrößen, wie beispielsweise die mechanischen Eigenschaften, die Bauteildichte, die Form- und Maßhaltigkeit, die Oberflächengüte, die Reproduzierbarkeit, die Prozessgeschwindigkeit, die Wirtschaftlichkeit sowie die Pulverausnutzung. Prinzipiell findet sich eine Vielzahl von potentiellen Einflussgrößen auf die Bauteilqualität von lasergesinterten Bauteilen. Wegner fasst die Einflussgrößen auf Basis zahlreicher früherer Untersuchungen nach der 6M-Methode (*Methode, Maschine, Mitwelt, Material, Mensch* und *Messung*) in Form eines Ishikawa-diagramms zusammen [126]. Insgesamt finden sich so 274 Einflüsse, die zum einen gezielt variiert werden können, um beispielsweise die Bauteilqualität zu steuern und zum anderen aber auch nur indirekt auf das Ergebnis wirken oder dieses zufällig beeinflussen. Um ein grundsätzliches Verständnis über den Prozess und damit einhergehende Einflussgrößen zu erlangen, wurde in zahlreichen Veröffentlichungen der Einfluss diverser Parameter auf ausgewählte Bauteileigenschaften entweder getrennt oder in Kombination untersucht.

- **Charakterisierung der Oberflächengüte**

Bisherige Forschungsarbeiten bezüglich der Oberflächenqualität unterscheiden sich grundlegend. Einige beziehen sich auf die Bauteilorientierung oder den Slice-Prozess, also die Zerlegung des Datensatzes in entsprechende Schichtgeometrien, während andere vorrangig den Einfluss verschiedener Fertigungsparameter wie Schichtstärke, Winkeleinstellungen oder Spurbreiten untersuchen. Dabei wird die Oberflächenqualität entweder durch die Rauheit oder den Grad des Orangenhauteffekts definiert.

Tumer stellt in [160] einen ersten Ansatz vor die Oberflächengüte über ein empirisches Modell vorherzusagen, indem er innerhalb eines faktoriellen Versuchsplans die Prozessparameter *Laserleistung*, *Schichtstärke* und *Bauteilorientierung* variiert. Dabei wird der Einfluss der Schichtstärke gefolgt von der Bauorientierung auf die Oberflächengüte für den Werkstoff Polycarbonat als herausragend identifiziert. Weiter untersucht Reddy innerhalb der Versuchsanordnung L_8 nach Taguchi die Prozessparameter *Laserleistung*, *Spurabstand* sowie *Bauteilorientierung*, wobei alle betrachteten Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächengüte haben [161]. Bacchewar hingegen stellt erstmals ein Regressionsmodell zweiter Ordnung auf Basis sowohl der Bauteilorientierung als auch aller für die Volumenergiedichte, siehe Formel 2-11, relevanten Größen auf [162]. Dabei wird auch die *Bauteilorientierung* als dominierender Faktor herausgestellt. Darüber hinaus zeigt sich, dass nach unten und nach oben gerichtete Oberflächen durchaus von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden. Die Erkenntnisse werden grundsätzlich von Srivastava bestätigt, welcher in starker Anlehnung an Bacchewar mit Hilfe eines *central composite rotatable design*-Versuchsplans die Oberflächengüte glasgefüllter Polyamid Bauteile untersucht [163]. Sauer untersucht erstmals den Effekt der Konturbelichtung und stellt entgegen der Annahmen heraus, dass sich die Oberflächenrauheit durch den Einsatz der Konturbelichtung erhöht [22]. Arbeiten von Kaddar [113] und später auch von Wegner [164] zeigen allerdings eine Verbesserung der Oberflächengüte durch eine Konturbelichtung und widerlegen somit beobachtete Erkenntnisse von Sauer. Während die vorherigen Veröffentlichungen einen Schwerpunkt auf die Größen der Energiedichteformel gelegt haben, betrachten Pham [165] und Sachdeva [166] neben diesen auch die Pulverbetttemperatur bzw. Belichtungslänge sowie die Anzahl der Belichtungen pro Schicht. Beide Studien zeigen einen signifikanten Einfluss der Temperatur auf den Grad des Orangenhauteffekts und die Oberflächenrauheit auf. Darüber

hinaus existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen, welche ähnlichen Methoden zur Qualifizierung der Oberflächengüte anderer additiver Verfahren anwenden oder diese, wie beispielsweise Kim, gegenüberstellen [167].

- **Form- und Maßhaltigkeit**

Für die Sicherung der Form- und Maßhaltigkeit lasergesinterter Bauteile weist Wang zunächst auf die Bedeutung der Genauigkeit des CAD-Modells, der Triangulation in das STL-Format sowie des Schichtzerlegungsalgorithmus innerhalb der Datenvorbereitung und -aufbereitung, hin [168]. Darüber hinaus zeigt Wegner in [169] den Einfluss fehlerhafter STL-Dateien auf die Bauteilqualität auf. Allerdings ist für die Produkt- und Prozessqualität des zu fertigen Modells nicht bloß dessen geometrische Beschreibung ausschlaggebend. So verbessert Nelson durch die Verwendung eines neuen Galvanometers die Bauteilgenauigkeit um bis zu 36 % auf $\pm 0,2$ mm [170]. Weiter untersucht Niino die Reduktion des Laserspots von 500 μm auf 130 - 150 μm zur Darstellung dünnwandiger Körper und erreicht dabei minimale Wandstärken von 0,18 mm [171]. Darüber hinaus wird in weiteren Veröffentlichungen der Einfluss der Bauteilpositionierung im Bauraum auf die Bauteilgenauigkeit untersucht und so Defizite im Temperaturmanagement der Anlagensysteme aufgezeigt [76], [172]. Als Gegenmaßnahme wird oftmals die Fertigung definierter Prüfkörpergeometrien vorgeschlagen, mit denen die Genauigkeit als relative Abweichung von den Sollmaßen erfasst werden kann. In Anlehnung an konventionellen Verfahren wie dem Gießen werden als Folge Skalierungsfaktoren zur Korrektur der Schwindung vorgeschlagen.

In Anlehnung an die Darstellung der Oberflächengüte beeinflussen neben einer intelligenten Prozessführung besonders die gewählten Prozessparameter die Form- und Maßhaltigkeit entscheidend. So wird auch hier der Einfluss der Prozessparameter hinsichtlich der Bauteilgenauigkeit vielfach mit Methoden der statistischen Versuchsplanung erfasst. Raghunath untersucht mit Hilfe der *Taguchi* Methode die Parameter *Laserleistung*, *Lasergeschwindigkeit*, *Spurabstand*, *Bauraumtemperatur* sowie die *Scanlänge* [173]. Hier identifiziert er in Abhängigkeit von der Messrichtung unterschiedliche Signifikanzen. Analog dazu verwendet auch Yang die *Taguchi* Methode zur Findung optimierter Prozessparameter und Gewährleistung der Maßhaltigkeit [172]. Dagegen nutzt Senthilkumaran einen *Central Composite Design* Versuchsplan und stellt neben der Bauteilorientierung die Bauteilgröße als entscheidendes Merkmal heraus [174]. Darüber hinaus werden in weiteren Veröffentlichungen genetische Algorithmen zur Vorhersage der Schrumpfung und automatischen Optimierung vorgestellt [175], [176], [177].

Erste Ansätze von Becker [178] und Kruf [179] beschäftigen sich zudem mit der Auslegung einer allgemeingültigen Konstruktionsrichtlinie, um die Potentiale des Verfahrens effektiver nutzen zu können. Weiter wurde in [169] ein Prüfkörper mit maßgeblichen Geometrien entwickelt und auf Basis der Daten von 17 Anwendern und Herstellern Regeln und Vorgaben für eine RM-gerechte Konstruktion geliefert und Möglichkeiten der Funktionsintegration aufgezeigt.

- **Mechanische Eigenschaften**

Weitere Untersuchungen betrachten als Zielgröße die mechanischen Eigenschaften. Zur Sicherung von mechanischen Eigenschaften wie der *Bauteildichte*, dem *E-Modul*, der *Zugfestigkeit* und der *Bruchdehnung* lasergesinterter Bauteile streben viele Studien die Optimierung der einstellbaren Prozessparameter an, wobei der Schwerpunkt hier auch maßgeblich auf dem Werkstoff Polyamid 12 liegt.

Tontowi stellt unter anderem ein Modell zur Simulation der Dichte auf und zeigt durch seine experimentellen Ergebnisse, dass eine werkstoffabhängige Mindestenergiedichte eingestellt werden muss, um geforderte Bauteildichten zu erreichen [180]. Eine Erhöhung der Energieeinbringung resultiert durch eine erhöhte Schmelztiefe prinzipiell in einer erhöhten Dichte, wobei sich nach Gibson bei der Verarbeitung von Polyamid 12 eine maximale Bauteildichte ab einem Volumenenergieeintrag von $0,2 \text{ J/cm}^3$ einstellt [181]. Die Betrachtung der mechanischen Eigenschaften zeigt deutliche Parallelen. So existieren eine Reihe von Studien, welche die Zusammenhänge der Prozessparameter und Bauteileigenschaften entweder in Form von Einzelversuchen oder mehrstufigen Versuchsplänen untersuchen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass zunächst die eingebrachte Energiedichte einen höchst signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat [22], [113], [182]. Die Empfehlungen optimaler Volumenenergiedichten streuen hier in Abhängigkeit des untersuchten Werkstoffs. Generell führt allerdings auch hier eine Erhöhung durch Variation der Einzelgrößen zu verbesserten mechanischen Eigenschaften. Ein zu hoher Energieeintrag hat jedoch Zersetzungserscheinungen und damit ein Absinken der betrachteten Eigenschaften zur Folge. Darüber hinaus zeigt sich durch Arbeiten von Beal und Usher, dass erhöhte Pulverbetttemperaturen in einer Steigerung der mechanischen Eigenschaften resultieren [182], [177].

Allen Studien ist gemein, dass neben den Größen der Energiedichteformel besonders die Bauteilorientierung einen signifikanten Einfluss auf die Materialeigenschaften hat. Hier wird neben der Richtungsabhängigkeit innerhalb der Bauebene auch selbige in Baufortschrittsrichtung untersucht. Wird der Einfluss der Orientierung innerhalb der Bauebene betrachtet, sind die Ergebnisse nach verwendeter Scanstrategie zu unterscheiden. Wird zur Belichtung eine parallele Scanstrategie verwendet, ergeben sich Zugfestigkeitsunterschiede von bis zu 8 % [183], [184]. Bei der Verwendung einer kreuzweisen Strategie sind die Festigkeitswerte nach Kaddar annähernd gleich [113], die Schichtebene kann als isotrop beschrieben werden. Bei der Betrachtung des Materialverhaltens in Baufortschrittsrichtung ist jedoch ein ausgeprägtes anisotropes Verhalten zu beobachten. So zeigt unter anderem Wartzack, dass die Zugfestigkeit in der Bauebene um ca. 23 % höher ist als in Baufortschrittsrichtung [183]. Ähnliche Tendenzen zeigen sich auch bei der richtungsabhängigen Analyse weiterer mechanischer Bauteileigenschaften, wie etwa der Bruchdehnung [22]. Amado-Becker klassifiziert dieses Werkstoffverhalten als eine Unterform der Anisotropie, der transversalen Isotropie [185]. Dies wird weiter auch von Muraru in seiner Arbeit über Berechnungsmöglichkeiten lasergesinterter Knöchelorthesen bestätigt [186]. Untersuchungen zeigen weiter, dass sich die Festigkeitswerte aller betrachteten Orientierungen mit Erhöhung der Volumenenergiedichte immer mehr angleichen und Abweichungen unter 10 % erreicht werden können [187], [188]. Darüber hinaus können sowohl Usher [177] als auch Griebach [189] anisotrope Effekte mit Hilfe einer Doppelbelichtungsstrategie reduzieren.

3 ZUSAMMENFASSENDER BEWERTUNG UND ZIELSETZUNG

Auf Grund der guten Materialeigenschaften sowie der Einhaltung der geometrischen Produktspezifikationen wird das Laser-Sintern von Kunststoffen verstärkt durch die Serienproduktion, dem *Rapid Manufacturing*, geprägt. Die Fertigung lasergesinterter Bauteile beschränkt sich nach heutigem Stand der Technik auf wenige Werkstoffe, allen voran ist der, trotz seiner auf dem Gesamtweltmarkt eher unbedeutenden Rolle, derzeitige Standardwerkstoff PA 12 zu nennen. Darüber hinaus wurden seit der Markteinführung nur wenige Werkstoffe für das Laser-Sintern erforscht und evaluiert. Vorfälle wie der Schadensfall im Chemiepark Marl im Jahr 2012 und die daraus resultierende Rohstoffverknappung, aber auch die immer weiter steigenden Anforderungen an die Produkteigenschaften durch die Erschließung neuer Anwendungsfelder lassen die Defizite des Laser-Sinterns immer deutlicher werden. So genügt es aus heutiger Sicht nicht mehr, primär lediglich einen Werkstoff nutzen zu können, da viele Eigenschaftsprofile nur noch bedingt erfüllt werden können. Um den erklärten Weg zum Rapid Manufacturing weiter erfolgreich zu bestreiten, rückt daher die Suche nach neuen Materialsystemen, welche den Marktbedarf abbilden, immer mehr in den Fokus einschlägiger Forschung.

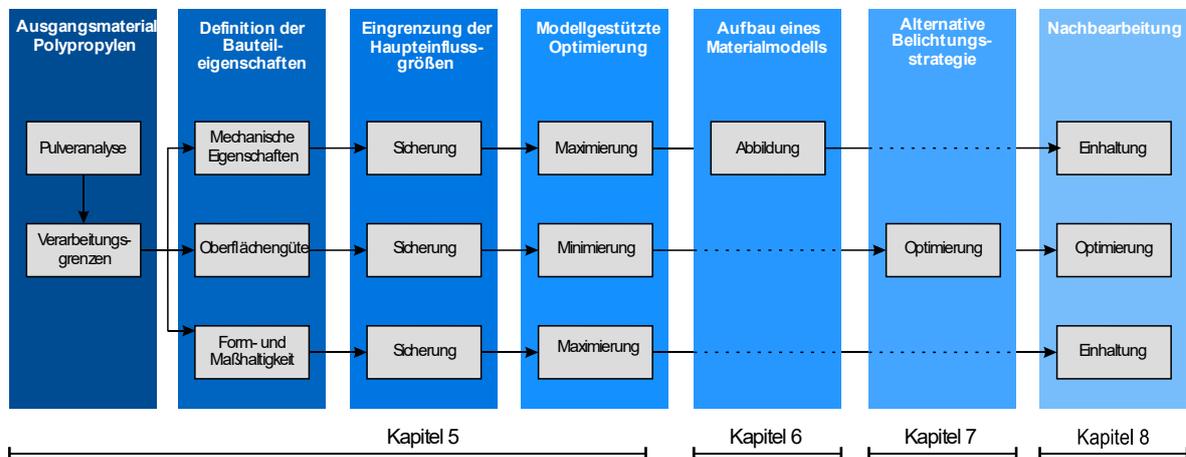


Bild 3-1 - Allgemeine Vorgehensweise zur Erfüllung der Zielvorgabe

Darüber hinaus wurde innerhalb des Stands der Technik die Komplexität des Laser-Sinterverfahrens anhand der physikalisch-mathematischen Zusammenhänge entlang der gesamten Prozesskette nachgewiesen. Hieraus ergibt sich eine Reihe von Fragestellungen, welche im Rahmen der Arbeit erforscht werden sollen. In der vorliegenden Arbeit fokussieren sich die Untersuchungen auf den Werkstoff Polypropylen, welcher sich, trotz der wirtschaftlichen Bedeutung auf dem Gesamtmarkt, innerhalb des Laser-Sinterverfahrens noch nicht etablieren konnte. Bild 3-1 zeigt dabei die allgemeine Vorgehensweise der Arbeit, welche sich an den folgend formulierten Problemstellungen orientiert:

■ **Prozesseitige Optimierungsstrategien**

Die Ausführungen innerhalb des Kapitels 2.7 zeigen, dass der Laser-Sinterprozess durch eine Vielzahl von Stell- und Regelgrößen geprägt ist und trotz der Vielzahl an Forschungsbeiträgen nur rudimentär verstanden wird. Weiter zeigt der Stand der Technik, dass sich die bisherigen Vorgehensweisen grundsätzlich unterscheiden. So werden zum Teil lediglich einzelne Prozessgrößen variiert, darüber hinaus werden Methoden der statistischen Versuchsplanung genutzt. Durch die bisherige Betrachtung weniger Einflussgrößen konnten Zusammenhänge zwischen einstellbaren Maschinenparametern und Bauteileigenschaften nicht vollständig erfasst werden, zudem ergeben sich teilweise widersprüchliche Erkenntnisse. Der Optimierungsversuch lediglich einer Bauteileigenschaft hat darüber hinaus meist eine Verschlechterung anderer Bauteileigenschaften zur Folge. Zusätzlich beruht das aktuelle Prozessverständnis bis auf wenige Ausnahmen primär auf dem Umgang mit dem Standardwerkstoff PA 12. Die Überführung bereits gewonnener Erkenntnisse auf alternative Werkstoffe gestaltet sich auf Grund der Komplexität der Prozessführung des Laser-Sinterns schwierig.

Erstes Teilziel der vorliegenden Arbeit besteht daher in der Entwicklung eines allgemeingültigen Vorgehens zur werkstoffgerechten Bearbeitung neuer teilkristalliner Kunststoffe und weiter in der Herausarbeitung prozesseitiger Optimierungsstrategien. Hierzu muss zunächst die Vielzahl möglicher Einflussgrößen auf die definierten Bauteileigenschaften herausgestellt und mit Hilfe entsprechender Versuchsmethodiken auf die Haupteinflussgrößen reduziert werden. Diese sollen für weitere Versuche aufgegriffen werden, um Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Zielgrößen mit Hilfe von Regressionsanalysen darstellen zu können. Im Ergebnis dieser Untersuchungen soll zum einen das Prozessverständnis erweitert und damit die Prozessstabilität gesichert werden. Zum anderen sollen optimierte Parametersätze zur Reduzierung ausgewählter Bauteileigenschaften wie der Oberflächengüte sowie der mechanischen und geometrischen Produkteigenschaften gefunden werden.

■ **FEM**

Das richtungsabhängige Materialverhalten von lasergesinterten Thermoplasten ist innerhalb der Bau- bzw. Schichtebene weitestgehend isotrop. In Baufortschrittsrichtung wird das Materialverhalten hingegen als anisotrop klassifiziert. Diese Sonderform wird als transversale Isotropie beschrieben. Das Phänomen des anisotropen Materialverhaltens wird als Problem erkannt und durch verschiedene Strategien zu lösen versucht. Primärer Lösungsansatz ist es, den Effekt der Anisotropie durch Weiterentwicklung des Verfahrens zu minimieren. Gleichzeitig wird der Anwender durch Regeln und Richtlinien bei der Positionierung des Bauteils im Bauraum unterstützt. Da die Positionierung im Bauraum heute hauptsächlich auf der Erfahrung des Anwenders beruht, gibt es weiterhin Bestrebungen, die optimale Bauteilpositionierung durch einen Computeralgorithmus zu bestimmen. Alle genannten Maßnahmen streben nach der Minimierung des Auftretens bzw. der Auswirkung der anisotropen Materialeigenschaften. Ein grundsätzlich anderer Ansatz stellt die gezielte Ausnutzung der anisotropen Eigenschaften schon innerhalb der Konstruktion dar. Da sich das Laser-Sinter-Verfahren besonders durch die Fertigung geometrisch komplexer Körper auszeichnet, stößt die klassische technische Mechanik bei der Festigkeitsberechnung eben jener jedoch an ihre Grenzen. Um die notwendigen mechanischen Zusammenhänge berechnen zu können, wird daher in der Regel auf das mathematische Werkzeug der Finiten-Elemente-Methode (FEM) zurückgegriffen. Eine essentielle Grundvoraussetzung für die Anwendung der FEM ist ein gültiges Materialmodell, also eine mechanisch-mathematische

Beschreibung des Werkstoffverhaltens. Ein entsprechendes Materialmodell und daraus folgend ein Festigkeitsnachweis für lasergesinterte Bauteile, beispielsweise in Anlehnung an die FKM-Richtlinie für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen [190], ist nach aktuellem Stand der Technik nicht denkbar. Innerhalb der vorliegenden Arbeit sollen daher erste Ansätze eines Materialmodells erarbeitet werden, um in Zukunft die Möglichkeit zu haben, auch sicherheitsrelevante Bauteile im Laser-Sinterprozess zu fertigen.

■ **Belichtungsstrategien**

Um den anisotropen Effekten entgegenzuwirken, werden Bauteile nach aktuellem Stand der Technik in optimierter Orientierung gefertigt. Bei der Wahl einer geeigneten Bauteilorientierung gilt es eine Vielzahl von Qualitätsanforderungen an das Bauteil zu berücksichtigen. Auf Grund mangelnder Automatismen ist hier ein hoher Erfahrungsschatz des Maschinenbedieners gefordert. Eine zunehmende Komplexität und erhöhte Bauteilanzahl erschweren eine optimierte Orientierung. Untersuchungen im Bereich der Qualitätssicherung der Oberflächengüte lasergesinterner Bauteile zeigen, dass optimierte Prozessparameter nur für ausgewählte Bauteilorientierungen gelten. Da nach jetzigem Stand der Technik Bauteile lediglich in Unterscheidung nach Füllung und Kontur belichtet werden können, geht die Empfehlung dahin, Bauteile in Abhängigkeit von ihrer Orientierung individuell zu belichten. Auf Grund der Bauteilkomplexität und der großen technologischen Stärke additiver Verfahren sind entsprechende Empfehlungen nur bedingt einzusetzen. So gewählte Parametersätze optimieren nur präferierte Flächenorientierungen. Für andere Orientierungen können alternative Belichtungseinstellungen jedoch geeigneter sein. Als weiteres Teilziel dieser Arbeit soll der Ansatz verfolgt werden, eine Sicherung der Bauteilqualität dadurch zu gewährleisten, nicht das Bauteil manuell orientieren zu müssen, sondern das Bauteil in Abhängigkeit der Orientierung mit definierten Belichtungsstrategien zu fertigen. Aktuelle Anlagensoftwares bieten keine Möglichkeit das Bauteil so zu manipulieren, dass einzelne Bauteilflächen in Abhängigkeit ihrer Orientierung mit separaten Parametern belichtet werden können. Es soll daher ein Softwaretool programmiert werden, welches eine Ansteuerung individueller Bauteilflächen ermöglicht, mit dem Ziel, die Oberflächengüte zum einen weiter zu steigern und zum anderen die Streuung der Oberflächengüte zu minimieren.

■ **Nachbearbeitungsverfahren**

Verfahrensbedingt wird der „Stufeneffekt“, welcher die Oberfläche der pulverbettbasierten additiven Fertigungsverfahren maßgeblich prägt, niemals eliminiert werden können. Nach heutigem Stand der Technik werden lasergesinterte Bauteile lediglich manuell durch den Strahlprozess nachbearbeitet. Dabei zielt der Nachbearbeitungsschritt primär darauf ab, Pulveranhaftungen zu entfernen, eine gezielte Verbesserung der Oberflächengüte wird in der Regel nicht erreicht. Je nach Anforderung an das lasergesinterte Produkt ist es jedoch notwendig die Qualität der Produktoberflächen nachzuarbeiten. Die Palette von denkbaren Nachbearbeitungsverfahren ist sehr groß; prinzipiell können die gefertigten Bauteile durch mechanisch, chemisch oder thermisch abtragende oder schichtbildende Verfahren entweder manuell oder automatisiert behandelt werden. Dabei ist bei individueller Einzelfertigung eine konventionelle Nachbearbeitung durch Handarbeit grundsätzlich vertretbar. In Hinblick auf die Fertigung von Kleinserien ist der Anwender jedoch auf die Verwendung (teil-)automatisierter Prozesse angewiesen. Die dargelegten Untersuchungen im Kapitel 2.6 zeigen, dass der Bedarf an geeignete Nachbearbeitungsverfahren durchaus erkannt wurde. Im Ergebnis wurde bisher allerdings kein geeignetes Verfahren qualifiziert, welches die Zielvorgaben erfüllt. Unter dem Fokus der Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit und unter Gewährleistung der geometrischen Produktspezifikationen soll die Findung und Qualifizierung potentieller Verfahren mit in die Untersuchungen einbezogen werden.

4 VERSUCHSEINRICHTUNG UND VORGEHENSWEISE

Im folgenden Kapitel werden die Rahmenbedingungen für die vorliegende Arbeit definiert. Zur Beschreibung von Qualitätsmerkmalen lasergesinterter Bauteile werden die Zielgrößen benannt und zugehörige Mess- und Prüfmethodiken definiert. Dies schließt die Vorstellung des Anlagensystems, neu zu entwickelnder Prüfkörpergeometrien sowie eines einheitlichen Kennzeichnungssystems zur Fertigung der Bauteile mit ein. Aus Gründen der Reproduzier- und Vergleichbarkeit erfolgt die Durchführung sämtlicher experimenteller Versuche sowie die messtechnische Erfassung der Zielgrößen auf den gleichen benannten Systemen. Eine bewährte Methode für die experimentelle Untersuchung bei reduziertem Versuchsaufwand stellt die statistische Versuchsplanung dar. Die Grundlagen hierfür werden in Abschnitt 4.3 eingeführt.

4.1 Bauteilfertigung

4.1.1 Anlagentechnik

Für die Parameteruntersuchungen sowie zur Validierung des FEM-Modells und der Qualifizierung potentieller Nachbearbeitungsverfahren wird das Laser-Sinteranlagensystem *Formiga P 100* (Hersteller: *EOS GmbH*, [191]) eingesetzt, vergleiche Bild 4-1.

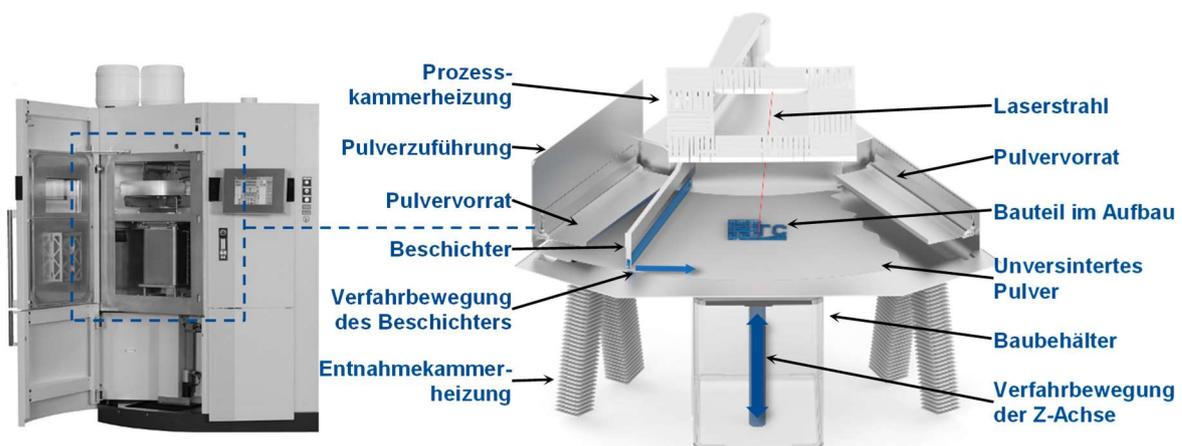


Bild 4-1 - Grundlegender Aufbau der Laser-Sinteranlage Formiga P 100

Das hier eingesetzte Anlagensystem hat im Gegensatz zum vorgestellten Prozessablauf in Kapitel 2.5.2 eine Beschichter Klinge zur Materialbeschickung. Standardmäßig wird für die Verarbeitung des Werkstoffes PA 2200 eine gewölbte Klinge genutzt. Der aus der gewölbten Klinge resultierende Effekt, dass die oberste Pulverschicht nach dem Auftrag verdichtet wird, führt bei der Verarbeitung des Werkstoffes Sinterplast PP schon ab einem Temperaturfeld weit unterhalb der Verarbeitungstemperatur zu einem Aufreißen der Pulverdecke. Um diesem Phänomen entgegenzuwirken, wird an dieser Stelle eine flache Beschichter Klinge genutzt. Die Werkstoffbeschickung in den Pulvervorrat erfolgt kontrolliert über die

einseitige Pulverzuführungseinheit. Das für die Rückfahrt benötigte Pulver wird zusätzlich durch die Hinfahrt der Klinge mitgefördert und im rechten Pulvervorrat gelagert. Die Anlage verfügt über einen Bauraum von $x = 200 \text{ mm}$ $y = 250 \text{ mm}$ $z = 300 \text{ mm}$. Der Baubehälterboden wird über eine Z-Verfahreinheit definiert in Baurichtung verfahren.

Die Vorwärmung des Pulvers erfolgt über die ringförmig über dem Bauraum angeordnete Prozesskammerheizung. Zusätzliche Heizelemente innerhalb der Entnahmekammer sollen für eine homogene Temperaturverteilung auch während des Bauprozesses sorgen. Zur Bauteilbelichtung verfügt das System über einen 30 J/s CO_2 -Laser und ein Scannersystem mit einer maximalen Scangeschwindigkeit von 5000 mm/s .

4.1.2 Ausgangsmaterial

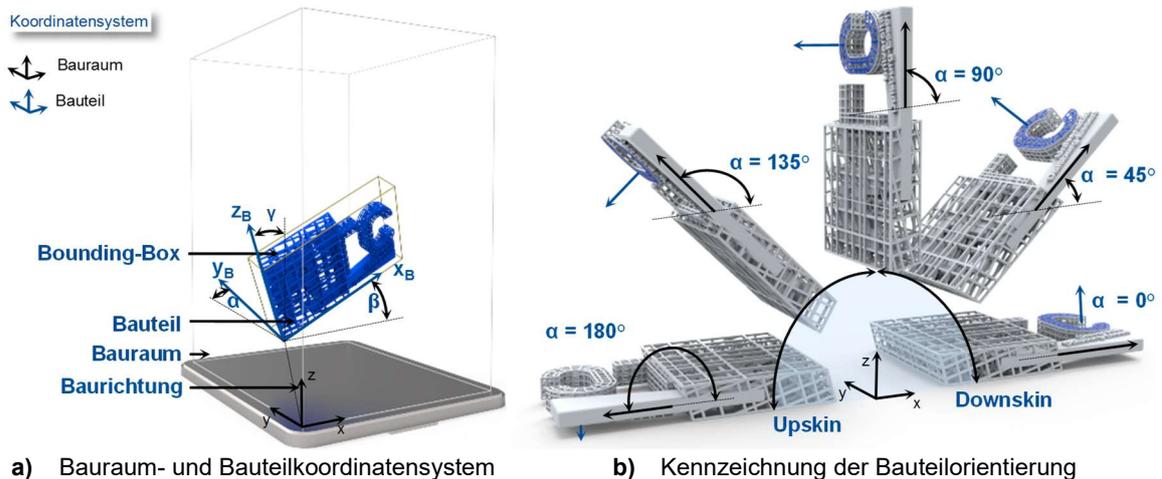
Für die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit wird der neuartige teilkristalline Laser-Sinterwerkstoff *Sinterplast*[®] *PP* der Firma *Microfol* verarbeitet. Durch die langzeitige thermische Belastung des Kunststoffpulvers während des Bauprozesses wird dieses in seiner chemischen und physikalischen Struktur geschädigt. Somit beeinflusst die Ausgangswerkstoffqualität die Verarbeitbarkeit sowie die Bauteilqualität. Für die Verarbeitung des de facto Standardwerkstoffs PA 12 ist in der Industrie eine Materialauffrischung von 30 - 50 % Neupulver (*PA 2200* der Firma *EOS GmbH*) bzw. 30 % Neupulver und 30 % Pulver aus dem Überlaufbehälter (*Duraform*[®] *PA* der Firma *3D Systems Corp.*) üblich [116]. Um die Recyclingfähigkeit des Werkstoffes *Sinterplast*[®] *PP* zu untersuchen, wurden von Backer in [192] variable Anteile von bereits genutzten Pulver dem Primärpulver beigemischt. Im Ergebnis führt eine Wiederauffrischungsrate von bis zu 50 % zur Einhaltung der ausgewiesenen mechanischen Eigenschaften.

Innerhalb der Vorversuche hat sich jedoch gezeigt, dass eine Zumischung von recyceltem Pulver zu einer Erhöhung der notwendigen Verarbeitungstemperatur führt. Diese musste so hoch gewählt werden, dass die Rauheit der Pulveroberfläche beim Beschichten stieg, die Bauteile sich beim Entpacken nur schwer vom umliegenden Pulver trennen ließen und die Bauteiloberflächen somit durch Pulveranhaftungen geprägt waren. Eine niedrigere Temperatur führte zu starkem Bauteilverzug, welcher verstärkt in Bauprozessabbrüchen resultierte. Weiter variierten die einzustellenden Parameter des aufgefrischten Pulvers in Abhängigkeit von der jeweiligen Pulvercharge.

Um eine Vergleichbarkeit innerhalb der Versuche gewährleisten zu können, wird somit auf die Beimischung von recyceltem Pulver verzichtet. Weiter wird vor der tatsächlichen Verarbeitung der Werkstoff durch mehrmaliges Mischen in einem Trommelmischer homogenisiert und innerhalb eines Siebprozesses von potentiellen Fremdkörpern getrennt.

4.1.3 Orientierung und Positionierung der Probenkörper

Im Zuge der Arbeit wird unter anderem der Einfluss der Positionierung und Orientierung der zu fertigenden Bauteile aus Polypropylen auf das Eigenschaftsprofil analysiert. In Bild 4-2 ist die Nomenklatur für die richtungsabhängigen Untersuchungen definiert. Das absolute Bauraumkoordinatensystem (x , y , z) hat seinen Ursprung in der vorderen unteren linken Ecke des Bauraums. Die x - y -Ebene wird parallel zum Baufeld aufgespannt. Der schichtweise Aufbau und damit der Baufortschritt erfolgt demnach in Richtung der z -Achse, beginnend mit dem Auftrag der ersten Schicht bei $z = 0 \text{ mm}$. Das Referenzkoordinatensystem des Bauteils ist auf den Ursprung des absoluten Koordinatensystems ausgerichtet und wird durch die Koordinaten x_B , y_B , z_B beschrieben.



a) Bauraum- und Bauteilkoordinatensystem

b) Kennzeichnung der Bauteilorientierung

Bild 4-2 - Nomenklatur bei der Positionierung und Orientierung innerhalb der Bauteilfertigung

Die Rotation zwischen Bauraum- und Bauteilkoordinatensystem ist durch die zugehörigen Drehwinkel gekennzeichnet. Der Winkel α , beginnend bei $\alpha = 0^\circ$ parallel zur x -Achse, definiert die Rotation um die x -Achse; der Winkel β , beginnend bei $\beta = 0^\circ$ parallel zur y -Achse beschreibt die Rotation um die y -Achse und der Winkel γ wird als Drehwinkel um die z -Achse beginnend bei $\gamma = 0^\circ$ parallel zur z -Achse herangezogen. Die Orientierung der Bauteiloberflächen wird gemäß Bild 4-2 b) in Abhängigkeit von der Lage des Normalenvektors eben jener Fläche zum Baufeld beschrieben. Beginnend mit einer Orientierung von 0° parallel zur x - y -Ebene sind alle Flächen bis 90° , also parallel zur Baurichtung, nach unten (eng. „downskin“) und alle Flächen zwischen 90° und 180° nach oben (eng. „upskin“) orientiert.

4.1.4 Verarbeitung und Aufbereitung der Proben

Eine gute Vorheizung des Anlagensystems ist für die Verarbeitung von Polypropylen sehr wichtig. Die *Formiga P 100* wird vor jedem Prozess mit einer Geschwindigkeit von $2^\circ\text{C}/\text{min}$ aufgeheizt. Mit anlagenbedingten fest definierten Haltezeiten entspricht dies einer gesamten Vorheizdauer von vier Stunden. Die Fertigung der Bauteile erfolgt nach den in den Prüfplänen definierten Prozess- und Belichtungsparametern. Nach jedem Bauprozess wird das Anlagensystem kontrolliert abgekühlt, bis die Temperatur im Inneren des Pulverkuchens unter 35°C gesunken ist.

Die Entnahme der Bauteile aus dem Pulverkuchen erfolgt händisch. Zudem wird die Bauteiloberfläche von anhaftendem Restpulver durch das Strahlschleifen befreit. Vergangene Arbeiten, vergleiche Kapitel 2.6, haben nachgewiesen, dass die Nachbearbeitung durch den Strahlprozess durchaus zu Veränderungen der Oberflächenqualität hinsichtlich der Rauheit führen kann. Daher wurde innerhalb von Vorversuchen ein Verarbeitungsparametersatz gesucht, welcher die Oberflächenqualität nicht beeinflusst und trotzdem von Pulveranhaftungen befreit. Somit werden alle Bauteile in einer Strahlkabine vom Typ *S90 I* der Firma *Klein* mit Glaskugeln, 2 Bar Strahldruck, einem Arbeitsabstand von 20 cm und einer Bearbeitungszeit von 20 - 30 s nachbearbeitet. Die Parameter wurden nach Möglichkeit konstant gehalten.

4.2 Bestimmung der Bauteileigenschaften

Innerhalb der Arbeit werden die nach Tabelle 4-1 klassifizierten Zielgrößen für die Beurteilung der Bauteilqualität herangezogen. Zur Qualifizierung des Laser-Sinterwerkstoffs Sinterplast® PP sowie anschließende Optimierungen der Bauteilqualität in Kapitel 5 werden sowohl die geometrischen Produktspezifikationen als auch mechanische Eigenschaften

analysiert. Zur Abbildung des Materialverhaltens lasergesinterter Bauteile mittels FEM-Analyse in Kapitel 6 steht die Betrachtung des mechanischen Wirkprinzips im Mittelpunkt. Innerhalb des Kapitels 7 wird durch die Einführung einer alternativen Belichtungsstrategie die Optimierung der Bauteiloberflächenqualität realisiert. Diese wird durch die Qualifizierung potentieller Nachbearbeitungsverfahren in Kapitel 8 unter Einhaltung aller anderen Zielgrößen weiter untersucht. Für die Erfassung der jeweiligen Zielgrößen werden Prüfkörpergeometrien konstruktiv ausgelegt und gefertigt, eine Zuordnung ist in den jeweiligen Kapiteln vermerkt. Sofern nicht anders gekennzeichnet, werden alle Probenkörper zur statistischen Absicherung nach entsprechender Norm mehrfach gefertigt bzw. vermessen.

Tabelle 4-1 - Definition der Zielgrößen und deren Einsatz innerhalb der vorliegenden Arbeit

Eigenschaften	Symbol	Norm	Prüfkörper	5	6	7	8
Geometrische Produktspezifikation		DIN V 32950		Kapitel			
Größenmaßelement		DIN 7168	PKG_01	✓			✓
Abstand	s	DIN 7168	PKG_01	✓			✓
Radius	r	DIN 7168	PKG_01	✓			✓
Winkel	α	DIN 7168	PKG_01	✓			✓
Mittenrauwert	R_a	DIN EN ISO 4288	PKG_02	✓		✓	✓
Gemittelte Rautiefe	R_z	DIN EN ISO 4288	PKG_02	✓		✓	✓
Kantenabrundung	a_K	DIN 13715	PKG_02				✓
Mechanische Eigenschaften		DIN EN ISO 3167					
E-Modul	E_t	DIN EN ISO 527	PKG_03	✓	✓		✓
Zugfestigkeit	σ_M	DIN EN ISO 527	PKG_03	✓	✓		✓
Bruchdehnung	ε_M	DIN EN ISO 527	PKG_03	✓	✓		✓
Schubmodul	G	DIN EN ISO 6721-2	PKG_03		✓		
Querkontraktionszahl	ν	DIN EN ISO 6721-2	PKG_04		✓		
Bauteildichte	ρ	DIN 1183-1	PKG_05	✓			
Härte	D	DIN EN ISO 7619-1					✓
Sonstige							
Farbabstand	ΔE	ISO 12647 / ISO 13655 / DIN 5033 Teil 2					✓
Bauteilmasse	m_B						✓

4.2.1 Erfassung der geometrischen Produktspezifikationen

Die geometrischen Produktspezifikationen (GPS) sowie den Nachweis der Bauteileigenschaften regelt das System der geometrischen Produktspezifikation und -verifikation. Auf Grund der Komplexität ist der Aufbau in der Vornorm DIN V 32950 [193] festgelegt. Dabei sind in einem Matrixmodell vier verschiedene Arten von Normen definiert, welche alle einer strukturierten Hierarchie unterliegen. Zur Abbildung von funktionellen Eigenschaften oder unterschiedlichen physischen Teilen eines Werkstücks kann der größte Anteil von Bauteilen in der Praxis auf einfache Geometrielemente zurückgeführt werden, die auf verschiedene Arten und Weisen kombiniert werden. Nach DIN EN ISO 17450-1 und DIN EN ISO 22432 sind diese als „(...) *ein Punkt, eine Linie, eine Fläche, ein Volumen oder eine Menge dieser Elemente (...)*“ definiert [194], [195]. Dabei wird das Nenngometrielement vom Konstrukteur als ideales Geometrielement dargestellt. Dieses wird in Abhängigkeit ihrer uneingeschränkten Freiheitsgrade in die sieben Invarianzklassen *sphärisch, eben, zylindrisch, schraubenförmig, rotationssymmetrisch, prismatisch* und *komplex* eingeordnet.

Die geometrischen Eigenschaften der Geometrielemente werden aktuell in der allgemeinen GPS-Matrix als Größenmaß, Abstand, Radius, Winkel, Form einer Linie und Form einer Fläche, jeweils bezugsunabhängig und -abhängig, Richtung, Lage (Ort), Rundlauf, Gesamtlauf, Bezüge, Rauheit, Welligkeit, Grundprofil, Oberflächenfehler und Kanten beschrieben [193]. Weiter wird die Definition der Abweichungen und Abmessungen der Geometrielemente durch die GPS-Merkmale realisiert [196]. Die Abweichung in Bezug auf das ideale Geometrielement wird in Oberflächenbeschaffenheit, Form, Ort, Richtung sowie Lauf un-

terschieden. Mit der Definition der geometrischen Merkmale ist es möglich, die Freiheitsgrade eines jeden Geometrieelements einzuschränken und unabhängig voneinander zu überwachen.

▪ Form- und Maßhaltigkeit / Größenmaß und Form

Die Form- und Maßhaltigkeit ist in der industriellen Fertigung neben der Oberflächengüte ein entscheidendes Qualitätsmerkmal von wettbewerbsfähigen Produkten. Die Eigenschaften eines idealen Geometrieelements werden durch vier Stufen von Eigenschaften definiert - *Gestalt*, *Maßparameter*, *Situationselement* und *Skelettelement*. Die Gestalt legt die ideale Geometrie durch eine mathematische Beschreibung fest. Dabei wird zwischen ebenen, zylindrischen, sphärischen und konischen Gestalten unterschieden. Die Maßparameter sind als lineares (Größen)Maßelement oder Winkel(größen)maßelement definiert. Als Größenmaßelemente werden in den verschiedenen Normen Zylinder, Kugel, zwei parallele, sich gegenüberliegende Flächen, Torus, Kegel sowie ein Keil bezeichnet. Winkelgrößenmaßelemente stellen beispielsweise Kegel und Keil dar. Weiter stellt das Situationselement das geometrische Merkmal fest, von dem ausgehend Lage und Richtung des Geometrieelements festgelegt werden. Die Reduzierung eines Größenmaßelements auf null ergibt schließlich das Skelettelement.

Auf Grundlage der Eigenschaften eines idealen Geometrieelements werden im Rahmen der Untersuchungen mehrere Prüfkörpergeometrien konstruktiv ausgelegt und genutzt. Der in Bild 4-3 dargestellte Probenkörper *PKG_01* fasst reduzierte Grundkörpergeometrien auf einer Grundplatte von $x = 90 \text{ mm} \times y = 90 \text{ mm} \times z = 3 \text{ mm}$ zusammen. Extrudierte Elemente werden in Form von Zylinder (c) und Quader (b) dargestellt, während subtrahierte Elemente anhand von Bohrungen (a) und Spaltmaßen (d) repräsentiert werden. Alle Geometrieelemente werden sowohl in Beschichterrichtung (x), orthogonal dazu (y) als auch in Baufortschrittsrichtung (z) ausgelegt, um Einflüsse der Orientierung während des Bauprozesses erfassen zu können. Des Weiteren wird der Durchmesser (Bohrung, Zylinder) sowie die Breite (Quader, Spalt) in Abstufungen von 0,2 mm beginnend mit einem Sollmaß von 0,2 mm bis auf 2,0 mm dargestellt. Es ergeben sich somit 10 Elemente in identischen Dimensionen für jedes Geometrieelement. Durch die Vermessung von Außen- und Bohrungsdurchmessern (e), Winkelabweichungen in Z-Richtung und auf der XY-Ebene (f) und schließlich die Maßhaltigkeit in allen Raumrichtungen (g) wird der Prozess auf die Erfüllung der Form-, Lage- und Maßhaltigkeit hin interpretiert.

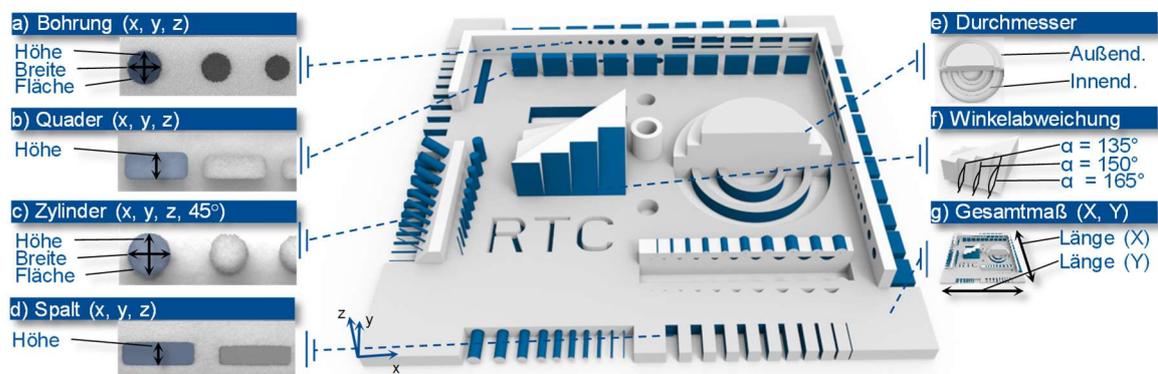


Bild 4-3 - Prüfkörper *PKG_01* zur Erfassung der geometrischen Produktspezifikationen

Die Erfassung der Geometrieelemente des Probenkörpers *PKG_01* erfolgt unter dem Auf- und Durchlicht-Digital-Zoom-Mikroskop *Di-Li 2004* der Firma *Distelkamp-Electronic* mit ei-

ner 82-fachen Vergrößerung. Die Aufnahmen werden entlang des jeweiligen Situationselements erstellt und durch die Software *Adobe Photoshop CS 5 WIN* [197] ausgewertet. Die Messungen werden mit Hilfe eines Messprotokolls aufgezeichnet, welches neben den allgemeinen Informationen wie Skaleneinheiten erweiterte Informationen wie Fläche, Höhe und Breite der Geometrielemente enthält. Gesamtmaße sowie Winkelabweichungen und Außen- bzw. Innendurchmesser werden durch eine Koordinatenmessmaschine vom Typ C3 5.4.4 der Firma *Nikon* unter Verwendung einer Messspitze mit einem Durchmesser von 2 mm vermessen.

Darüber hinaus wird eine kompaktere Geometrie durch den Prüfkörper *PKG_02* mit den Abmaßen $s_x = 37,5$ mm, $s_y = 30$ mm, $s_z = 26$ mm zur Erfassung des Stufeneffekts konstruktiv ausgelegt, siehe Bild 4-4. Dabei wird sowohl die nach unten ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$), senkrecht zur Bauebene (90°) als auch nach oben ($115^\circ, 130^\circ, 145^\circ, 160^\circ, 175^\circ, 180^\circ$) gerichtete Bauteiloberfläche realisiert. Zugleich wird darauf geachtet, eine ausreichende Zugänglichkeit der taktilen Messwerkzeuge zu gewährleisten. Zur detaillierten Abschätzung der Maßhaltigkeit und Untersuchungen der Zugänglichkeit bei der Findung potentieller Nachbearbeitungsverfahren werden weiter eine Bohrung ($\varnothing_B = 12$ mm) sowie jeweils zwei konkave ($d_3 = 5$ mm, $d_4 = 15$ mm) und konvexe ($d_1 = 6$ mm, $d_2 = 7$ mm) Formen integriert.

Für die Bauteilanalyse des Probenkörpers *PKG_02* wird das 3D Messsystem *ATOS Triple Scan* der Firma *GOM* genutzt. Mit Hilfe der 3D-Inspektionssoftware *GOM Inspect* werden die 3D-Punktwolken der eingescannten Bauteile für die Form- und Maßanalyse aufbereitet und ausgewertet. Explizit werden so die konkaven und konvexen Flächenelemente und der Bohrungsdurchmesser für die Beurteilung der Formtreue sowie Abmessungen in allen Raumrichtungen für die Beurteilung der Maßhaltigkeit erfasst und mit den Soll-Geometriedaten verglichen.

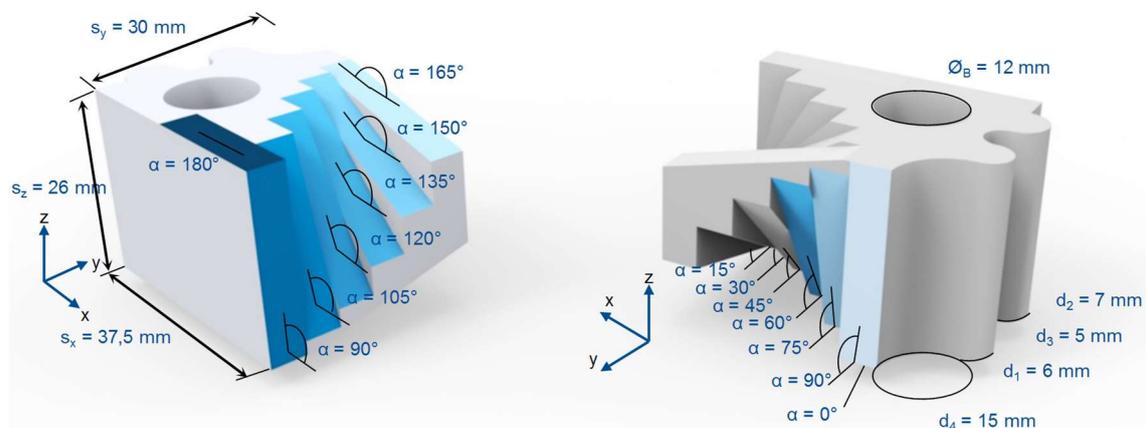


Bild 4-4 - Prüfkörper *PKG_02* zur Erfassung der geometrischen Produktspezifikationen

■ Oberflächenbeschaffenheit

Es ist fertigungstechnisch nicht möglich, eine geometrisch ideale Werkstückoberfläche herzustellen, der Laser-Sinterprozess macht hier keine Ausnahme. Die durch das Fertigungsverfahren bedingte regelmäßige oder unregelmäßige Abweichung der messtechnisch erfassten Ist-Werkstückoberfläche zur geometrisch idealen wirklichen Werkstückoberfläche wird nach DIN 4760 [198] als Gestaltabweichung bezeichnet und in sechs Ordnungen unterteilt. Gestaltabweichungen 1. Ordnung werden als Formabweichungen definiert und sind bei der Betrachtung der gesamten Ist-Oberfläche eines Formelements feststellbar. Überlagert werden diese von der Welligkeit, überwiegend periodisch auftretende Gestaltabwei-

chungen am Werkstück, deren Wellenlänge größer ist als die Rillenabstände seiner Rauheit. Gestaltabweichungen der Ordnung 3 bis 5 werden als Rauheit definiert und fassen alle regelmäßig oder unregelmäßig wiederkehrenden Gestaltabweichungen zusammen, deren Abstände nur ein (relativ) geringes Verhältnis ihrer Tiefe betragen. Die 5. und 6. Ordnung beschreiben den Gefügeaufbau bzw. die Gitterstruktur und sind daher nur durch (Raster-elektronen-)Mikroskopie messbar. [199] [200]

Für die Erfassung der Oberflächengüte sowohl bei der Qualifizierung in Kapitel 5 als auch bei der Evaluierung neuer Scanstrategien in Kapitel 7 und der Findung potentieller Nachbearbeitungsverfahren in Kapitel 8 wird der in Bild 4-4 entwickelte Prüfkörper genutzt. Um den Einfluss der Oberflächenorientierung zu untersuchen, werden sowohl die nach unten (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75°), senkrecht zur Bauebene (90°) als auch nach oben (115° , 130° , 145° , 160° , 175° , 180°) gerichteten Bauteiloberflächen vermessen. Erfasst wird die Oberflächenbeschaffenheit mit dem Tastschnittgerät *Surftest SJ-402* der Firma *Mitutoyo Messgeräte GmbH* [201]. Das gemessene Oberflächenprofil ist hier das Profil nach Abtasten des wirklichen Oberflächenprofils und wird durch die Wirkung des Tastspitzenradius r_{tip} gefiltert. Da sich im Allgemeinen die Formabweichung, Welligkeit und Rauheit zu der Ist-Oberfläche überlagern, wird im Rahmen der messtechnischen Erfassung ein digitaler Gaußfilter nach DIN EN ISO 11562 eingesetzt, um das ungefilterte Primärprofil (P-Profil) in das Welligkeits-(W-Profil) und Rauheitsprofil (R-Profil) zu separieren. Das Primärprofil ergibt sich nach einer Tiefpassfilterung der Messwerte mit der Grenzwellenlänge λ_s , d. h. alle kurzwelligen Profilanteile ($<\lambda_s$) werden abgetrennt. Das Welligkeitsprofil ergibt sich durch die Tiefpassfilterung des Primärprofils mit der Grenzwellenlänge λ_c und der Hochpassfilterung mit der Grenzwellenlänge λ_f . Dementsprechend definiert sich das Rauheitsprofil durch eine Hochpassfilterung des Primärprofils mit der Grenzwellenlänge λ_c . [202] [203] [204]

Die Oberfläche additiv gefertigter Bauteile wird maßgeblich durch die Gestaltabweichungen 3. bis 5. Ordnung charakterisiert [205]. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit fokussieren sich daher primär auf die Rauheit und nutzen die im Folgenden beschriebenen Messgrößen.

Der arithmetische Mittenrauwert der Profildordinaten R_a ist definiert als der „arithmetischer Mittelwert der Beträge der Ordinatenwerte $Z(x)$ innerhalb einer Einzelmessstrecke“ [206] und berechnet sich nach Formel 4-1. Es handelt sich dabei um den Abstand von der Bezugslinie zu der arithmetisch gemittelten Strecke aller Absolutwerte innerhalb der Messstrecke. Dabei gibt die Bezugslinie (mittlere Linie) die Grenze an, in der die Berge und Täler den gleichen Flächeninhalt besitzen.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad \text{Formel 4-1}$$

$Z(x)$ ist die Höhe des gemessenen Profils an beliebiger Position x und l die Länge in Richtung der x -Achse (Mittellinie), die für die Erkennung der Gestaltabweichungen des auszuwertenden Profils verwendet wird. Bei der gemittelten Rautiefe R_z teilt sich die Gesamttaststrecke in sieben Einzelmessstrecken auf, wobei die Erste und die Letzte als Einlauf bzw. Nachlauf dienen. Die übrigen fünf Einzelstrecken besitzen die gleiche Länge und dienen zur Bestimmung der Oberflächengüte. Innerhalb jeder Einzelmessstrecke wird der Abstand des Ist-Profils vom höchsten zum tiefsten Punkt gemessen. Die gemittelte Rautiefe R_z ist das arithmetische Mittel aus den Abständen aller Einzelmessstrecken, vergleiche Formel 4-2.

$$R_z = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j R_z(i) \quad \text{Formel 4-2}$$

Dabei bezeichnet j die Anzahl der Einzelmessstrecken. Exemplarisch ist an dieser Stelle ein Rauheitsprofil nach λ_c -Hochpassfilterung mit Darstellung der Mittellinie in Bild 4-5 aufgeführt. Weiter sind hier alle für diese Arbeit relevanten Kenngrößen gekennzeichnet.

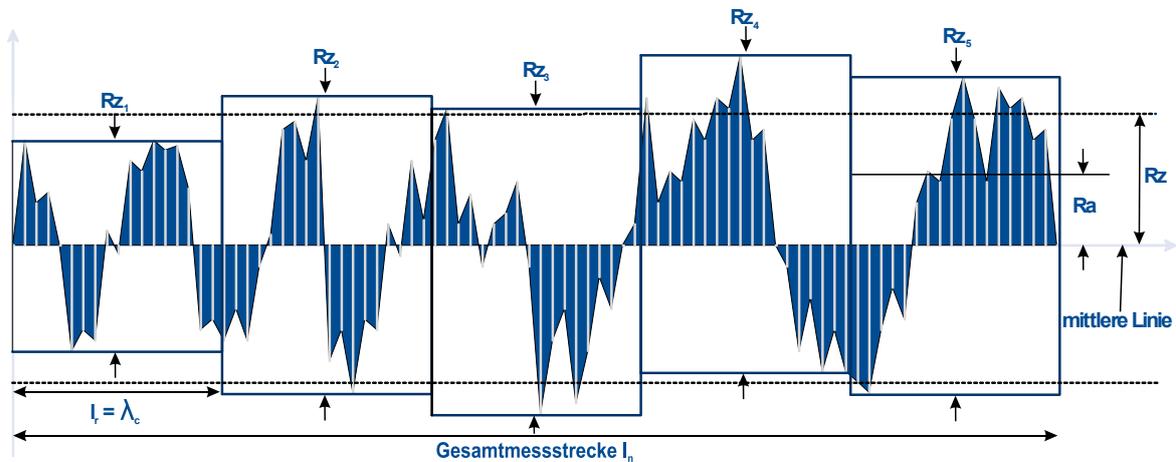


Bild 4-5 - Beschreibung der eingesetzten Rauheitskenngrößen

Die Wahl des Tastspitzenradius hat einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis, da Unebenheiten der Werkstückoberfläche nur so genau abgebildet werden können, wie die Spitze diese erfassen kann. Daher halten sich die in dieser Arbeit angewandten Messbedingungen für die Rauheitsmessungen an die in DIN EN ISO 4288 [204] definierten Bedingungen, vergleiche Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2 - Messbedingungen für die Rauheitsmessungen

Bereich	Nichtperiodische Profile		Periodische Profile	Messbedingungen nach DIN EN ISO 4288 und DIN EN ISO 3274			
	Ra [μm]	Rt, Rz [μm]	RSm [mm]	r_{tip} [μm]	l_r [mm]	l_n [mm]	l_t [mm]
1	>0,006...0,02	>0,025...0,1	>0,013...0,04	2	0,08	0,4	0,48
2	>0,2...0,1	>0,1...0,5	>0,04...0,13	2	0,25	1,25	1,5
3	>0,1...2	>0,5...10	>0,13...0,4	2	0,8	4	4,8
4	>2...10	>10...50	>0,4...1,3	5	2,5	12,5	15
5	>10...80	>50...200	>1,3...4	10	8	40	48

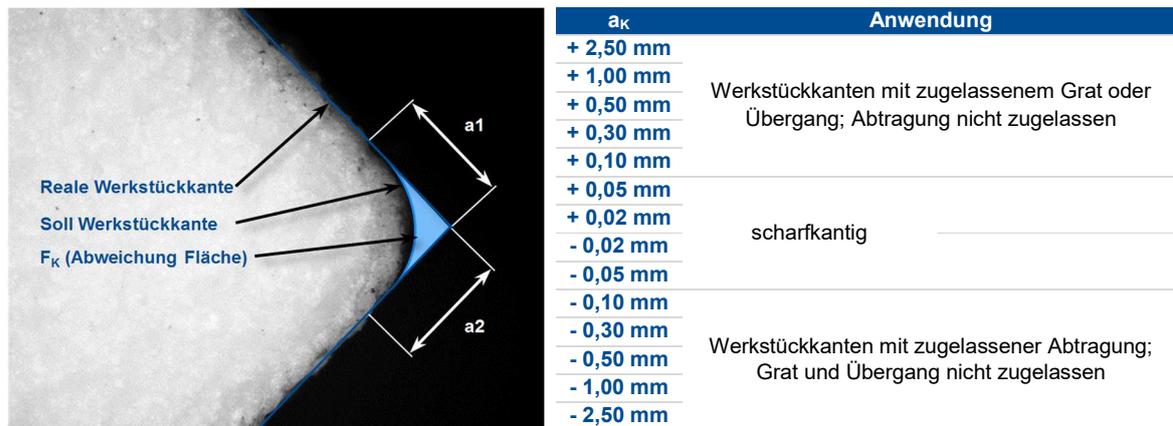
Die in Kapitel 2.5 aufgeführten Arbeiten zur Untersuchung der Oberflächengüte zeigen, dass die lasergesinterten Bauteiloberflächen im Ausgangszustand innerhalb des Bereichs 5 liegen. Im Zuge der Optimierungsansätze, hervorzuheben ist die Qualifizierung potentieller Nachbearbeitungsverfahren in Kapitel 8, wird eine Oberflächenbeschaffenheit im Bereich 3 bis 4 erwartet. Um die Ergebnisse qualitativ miteinander vergleichen zu können, werden die Messbedingungen konstant wie folgt definiert:

- Maximaler Tastspitzenradius: $r_{tip} = 2 \mu m$
- Einzelmessstrecke: $l_r = \lambda_c = 2,5 \text{ mm}$
- Anzahl der Einzelmessstrecken $n_E = 5$
- Gesamtmessstrecke: $l_n = n_E \times l_r = 12,5 \text{ mm}$
- Vorlaufstrecke: $l_V = l_r/2 = 1,25 \text{ mm}$
- Nachlaufstrecke: $l_N = l_r/2 = 1,25 \text{ mm}$
- Taststrecke: $l_t = l_V + l_n + l_N = 15 \text{ mm}$

Die Messrichtung muss stets so ausgerichtet sein, dass die Tastrichtung den größten Messwert erwarten lässt. Dementsprechend wird die Richtung bei allen Probekörpergeometrien rechtwinklig zur Rillenrichtung des zu erwartenden Treppenstufeneffekts definiert.

■ Kantenabrundung

In technischen Zeichnungen werden im Regelfall ideal-geometrische Formen ohne Abweichungen dargestellt, mit der Konsequenz, dass die realen Kantenzustände nicht berücksichtigt werden. Die Formabweichung einer Werkstückkante, definiert als Schnittlinie zweier Oberflächen, zum Idealzustand ist daher unter dem Begriff Kantenverrundung zusammengefasst. Diese ist in der DIN ISO 13715 [207] definiert als die Abweichung zur ideal-geometrischen Form einer Werkstückkante und wird durch die Messgröße a_K beschrieben, vergleiche Bild 4-6 a). Des Weiteren ist das Maß einer Kante (a) klassifiziert, siehe Bild 4-6 b). Demnach gilt eine Kante mit einem Maß von $-0,05 < a < + 0,05$ mm als scharfkantig, innerhalb der Grenzen $-2,5 \text{ mm} < a < + 2,5 \text{ mm}$ handelt es sich um eine Kante mit zugelassenem Grat und außerhalb der Grenzen wird der Abtrag als unzulässig definiert.



a) Abtragung an einer Außenkante

b) Empfohlene Kantenmaße

Bild 4-6 - Kantenzustände einer Außenkante nach DIN ISO 13715

Die Messung wird mit Hilfe eines Digital-Mikroskops der Firma *Distelkamp* [208] durchgeführt. Die Messbedingungen, wie beispielsweise Lichtverhältnisse, Fokus, etc., werden konstant gehalten. Die Annäherung der Messgröße a_K und die Bestimmung der Fläche F_K erfolgte anhand der Mikroskopaufnahme innerhalb der Software *Adobe Photoshop CS 5 WIN* [197]. Die Kantenabrundung soll besonders im Hinblick auf die Qualifizierung potentieller Nachbearbeitungsverfahren erfasst werden. Da verfahrensbedingt bei additiv gefertigten Bauteilen in der Regel eine Kantenverrundung zu verzeichnen ist, wird der Probenkörper *PKG_02* vor und nach dem Nachbearbeitungsprozess vermessen. Um eine qualitative Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu garantieren, beschränkt sich die Auswertung immer auf die gleiche Kante.

4.2.2 Erfassung der werkstoffmechanischen Eigenschaften

Technische Bauteile unterscheiden sich neben ihrer Geometrie und Dimension durch ihre Belastung. Die resultierenden Verformungen bestimmen prinzipiell das mechanische Verhalten des Bauteils, wobei hier zwischen unterschiedlichen Arten der Verformung unterschieden wird. Zum einen wird zwischen reversiblen Verformungen, auch als elastische bezeichnet, und irreversiblen, also plastischen Verformungen unterschieden. Zum anderen reagieren Materialien auf eine externe Belastung entweder mit zeitlicher Verzögerung, also zeitabhängig, oder die Verformung findet praktisch sofort statt. Es wird von einer zeitunabhängigen Verformung gesprochen.

Um das Verhalten eines Bauteils zu beschreiben, werden werkstoffspezifische Kennwerte benötigt, die von der Dimension und der Geometrie unabhängig sind [209]. Vorbereitend für

den Aufbau eines Materialmodells in Kapitel 6 werden an dieser Stelle die wichtigsten mechanischen Gesetze des zeitunabhängigen elastischen Werkstoffverhaltens für den einachsigen Belastungsfall hergeleitet.

Als erste normierte Größe wird die *Spannung* σ eingeführt, welche nach Formel 4-3 als Quotient aus wirkender *Kraft* F_N und der belasteten *Fläche* A definiert ist. In Abhängigkeit davon, ob die Kraft vom Material weggerichtet oder auf dieses gerichtet ist, wird zwischen Zug- und Druckspannung unterschieden.

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad \text{Formel 4-3}$$

Steht die Kraft F_N parallel zum Normalenvektor der Fläche A , so ist die Spannung als Normalspannung definiert. Wirkt stattdessen eine Kraft senkrecht zum Normalenvektor der Fläche A , wird diese als *Schubkraft* F_τ bezeichnet, der Quotient aus der tangential wirkenden Kraft und der Fläche A entsprechend als *Schubspannung* τ , vergleiche Formel 4-4.

$$\tau = \frac{F_\tau}{A} \quad \text{Formel 4-4}$$

Für alle weiteren Fälle wird die aus einer beliebig orientierten Kraft resultierende Spannung durch ihre Normal- und Schubspannungskomponenten ausgedrückt. Dies gilt sowohl für den ebenen als auch für den räumlichen Spannungszustand.

Weiter führt die resultierende Spannung im Zuge einer Belastung zu einer Formänderung des Bauteils, wobei diese sich prinzipiell aus Längenänderungen und Scherungen (Winkelverzerrungen) zusammensetzt. Die *Längenänderung* Δl ist definiert als die Differenz zwischen der *Ausgangslänge* l_0 und der *Länge* l_1 nach der Verformung und wird bezogen auf die Ausgangslänge nach Formel 4-5 als *Normaldehnung* $\varepsilon_{längst}$ bezeichnet.

$$\varepsilon_{längst} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad \text{Formel 4-5}$$

Analog dazu bewirkt die Schubspannung eine Schubverformung des Werkstoffs. Die resultierenden Winkelverzerrungen werden durch den *Scherungswinkel* ξ als Verhältnis von Winkelveränderung zu Ausgangswinkel ausgedrückt. Darüber hinaus werden die Schubspannung und der Scherungswinkel durch den *Schubmodul* G nach Formel 4-6 in einen linearen Zusammenhang gebracht.

$$\tau = G \cdot \xi \quad \text{Formel 4-6}$$

Die Beziehung zwischen den Spannungen und Verformungen wird durch die Stoffgesetze geliefert. Mit der Annahme eines homogenen und isotropen Materials und bei vorliegenden linearen, elastischen Verhältnissen, also innerhalb des einachsigen Spannungszustandes, liegen die Gesetzmäßigkeiten des Hook'schen Gesetzes nach Formel 4-7 vor. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Spannung und Dehnung ist als *Elastizitätsmodul* E_t definiert und ist ähnlich wie der Schubmodul eine Werkstoffkenngröße.

$$\sigma = E_t \cdot \varepsilon \quad \text{Formel 4-7}$$

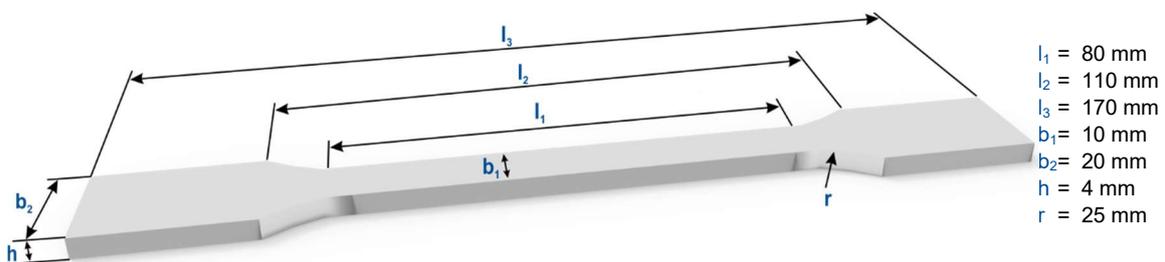
Weiter erfährt ein Körper neben einer Längsdehnung auch eine *Querdehnung* ε_{quer} , welche analog als Quotient der *Dickenänderung* Δd über der ursprünglichen *Dicke* d_0 definiert ist. Das werkstoffspezifische Verhältnis von Längs- und Querdehnung wird *Querkontraktionszahl* oder auch *Poisson-Zahl* ν genannt und berechnet sich durch folgende Formel 4-8.

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{quer}}{\varepsilon_{längs}}$$

Formel 4-8

■ Mechanische Materialkennwerte

Die Erfassung mechanischer Materialkennwerte zur Qualifizierung und Optimierung des Werkstoffes Polypropylen erfolgt durch Zugversuche nach DIN EN ISO 527-1 [210] und DIN EN ISO 527-2 [211]. Betrachtet werden die Kennwerte *Elastizitätsmodul* E_t , die *Zugfestigkeit* σ_M , also die Maximalspannung, die der Probekörper während eines Zugversuchs trägt, sowie die *Bruchdehnung bei Zugfestigkeit* ε_M , also die Dehnung bei der Maximalspannung, wenn diese im Streckpunkt auftritt. Ermittelt werden diese dabei unter einer konstanten uniaxialen Zugbelastung auf einer Mehrachsprüfmaschine *Z020 M* der Firma *Zwick*. Die Versuchsdurchführung erfolgt durch die externe Firma *polymerphys IK*. Als Probekörper (*PKG_03*) werden Schulterzugstäbe vom Typ A mit einer Gesamtlänge von 170 mm nach DIN EN ISO 3167 eingesetzt, siehe Bild 4-7.

Bild 4-7 - Schulterzugstab *PKG_03* nach DIN EN ISO 3167 [212]

Vor der tatsächlichen Prüfung werden die gefertigten Prüfkörper nach DIN EN ISO 291 [213] einem Konditionierklima mit einer Temperatur von 23 °C und einer relativen Feuchtigkeit von 50 % so lange ausgesetzt, bis sich ein Feuchtgleichgewicht zwischen Prüfkörper und Konditionierklima einstellt. Die Zugversuche werden im gleichen Klima durchgeführt. Zur Ermittlung des Zug-Elastizitätsmoduls wird bis zu einer Dehnungszunahme $\varepsilon_{längst} = 0,25 \%$ mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min gearbeitet, anschließend wird die Prüfgeschwindigkeit auf 50 mm/min erhöht.

■ Schubmodul

Im Gegensatz zu isotropen Werkstoffen kann der *Schubmodul* G im Falle der transversalen Isotropie, vergleiche Kapitel 6, nicht über die Querkontraktionszahl ermittelt werden, sondern stellt eine unabhängige Größe dar und muss im Versuch bestimmt werden. Prinzipiell steht eine Reihe von Prüfverfahren zur Ermittlung des Schubmoduls zur Verfügung. Auf Grund seiner Eignung zur Prüfung lasergesinterter Prüfkörper wird dieser durch den Torsionspendelversuch nach DIN EN ISO 6721-2 ermittelt [214]. Für die Versuchsdurchführung wird ein quaderförmiger, 80 mm langer Prüfkörper gewählt (gekennzeichnet mit *PKG_04*), dessen Querschnitt dem des Schulterzugstabes entspricht, um äußere Einflüsse bei beiden Probekörpern konstant zu halten. Analog zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte durch den Zugversuch werden die Prüfkörper vor Versuchsdurchführung gemäß DIN EN ISO 6721-1 konditioniert [215]. Die Durchführung erfolgt durch die Firma *Polymer Service GmbH Merseburg* mittels der Prüfmaschine *Instron 5507R* der Genauigkeitsklasse 1. Der Probekörper wird dabei durch zwei Klemmen gehalten, wobei eine fest arretiert und die andere über einen Stab mit einer Scheibe verbunden ist. Die Scheibe wird nach DIN EN ISO 6721-1, Tabelle 2, zu frei abklingenden Torsionsschwingungen angeregt. Durch die

während der Prüfung gemessenen Frequenzen und abklingenden Amplituden können sowohl Speicherkomponente als auch Verlustkomponente des komplexen Schubmoduls berechnet werden.

■ Härteprüfung

Die Prüfung zur Erfassung der *Shore D Härte* erfolgt mit Hilfe des Digital-Durometer *PCE-DD D* nach DIN 53505 [216]. Nach der Nullkalibrierung des Messinstruments wird die Auflagefläche des Druckkopfes mit einer Anpresskraft von 50 Newton stoßfrei auf die Prüffläche aufgesetzt. Dies bewirkt das Eindringen der 30° kegelförmigen Einstecknadel. Je nach Fließverhalten des Polymers kann das Einpendeln des Endwertes bis zu 15 Sekunden dauern. Die Eindringtiefe steht im direkten Verhältnis zur Werkstoffhärte und wird über eine Skala ermittelt. Dabei entspricht der Skalenwert 0 der maximal möglichen Eindringtiefe und der Skalenwert 100 einem sehr hohen Widerstand gegenüber dem Eindringen, bei dem praktisch kein Eindruck erzeugt wird.

■ Bauteildichte

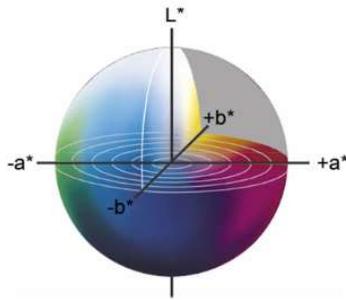
Die Bauteildichte wird gemäß DIN EN ISO 1183-1 [217] durch ein Dichtemessgerät der Firma *KERN & Sohn* vom Typ *EMB 200-3V* erfasst. Da der Werkstoff Polypropylen eine kleinere Dichte als die des destillierten Wassers von $0,998 \text{ g/cm}^3$ bei Raumtemperatur aufweist, wird ein Tauchkorb für schwimmende Feststoffe verwendet. Für die Dichtebestimmung wird ein quaderförmiger Probenkörper mit den Abmaßen 20 mm x 15 mm x 25 mm genutzt (*PKG_05*). Die Kanten werden hier bewusst abgerundet, damit potentielle Luftblasen besser abperlen und das Messergebnis somit nicht verfälschen können. Die Probenkörper werden zuerst in Luft und anschließend in der Hilfsflüssigkeit, deren Dichte bekannt ist, gewogen. Die Auswertung der Dichte ρ erfolgt über den aus der Gewichts-differenz resultierenden Auftrieb.

4.2.3 Weitere Bauteileigenschaften

■ Farbgebung

Generell liegt die Schwierigkeit, Farben visuell miteinander zu vergleichen, in der subjektiven Farbwahrnehmung des Betrachters. Um Farbänderungen im Verlauf der Arbeit charakterisieren zu können, erfolgt eine Bewertung durch den euklidischen Farbabstand ΔE , welcher definiert ist als die „*Größe des empfindungsgemäßen Unterschiedes zwischen zwei Farben*“ [218]. Der für diesen Wert benötigte Lab-Farbraum ist durch ein dreidimensionales Koordinatensystem beschrieben, vergleiche Bild 4-8.

Hier wird jede vom menschlichen Auge wahrnehmbare Farbe durch eine Koordinate in Form von $\{L^*, a^*, b^*\}$ geräteunabhängig und reproduzierbar genau beschrieben. Dabei definiert die L-Achse die Helligkeit der Farbe durch einen Wert zwischen 0 und 100, wobei Schwarz als 0 und Weiß als 100 angenommen wird. Die a-Achse gibt den Grün- und Rotanteil der Farbe im Skalenbereich -100 bis 100 an, wobei negative Zahlen für Grün und positive für Rot stehen. Der b-Achsenbereich im Skalenbereich von -100 bis 100 steht für den Blau- und Gelbanteil der zu definierenden Farbe, dabei repräsentieren die negativen Zahlenwerte die Farbe Blau und die positiven Werte die Farbe Gelb.



Stufe	ΔE	Bewertung
1	0,0 bis 0,5	Kein bis fast kein Unterschied
2	0,5 bis 1,0	Unterschied kann für das geübte Auge bemerkbar sein
3	1,0 bis 2,0	Merklicher Farbunterschied
4	2,0 bis 4,0	wahrgenommener Farbunterschied
5	4,0 bis 5,0	Wesentlicher Farbunterscheid, der selten toleriert wird
6	> 5,0	Die Differenz wird als andere Farbe bewertet

a) Lab-Farbsystem, aus [219]

b) Bewertungsschema der Farbabweichung ΔE nach [220]

Bild 4-8 - Definition des Lab-Farbraumes sowie des Farbabstandes

Der Farbstand ΔE wird nach DIN ISO 12647 und DIN ISO 13655 [221] mit folgender Formel berechnet. Dabei werden die Lab-Werte der Referenzprobe (*_p) und die der Vergleichsprobe (*_v) herangezogen und im Ergebnis anhand des in Bild 4-8 b) aufgeführten Bewertungsschemas nach DIN 6174 beurteilt.

$$\Delta E_{p,v} = \sqrt{(L_p^* - L_v^*)^2 + (a_p^* - a_v^*)^2 + (b_p^* - b_v^*)^2} \quad \text{Formel 4-9}$$

Die zur Bestimmung der Farbvalenz benötigten Aufnahmen der Probenkörper erfolgen mit der Spiegelreflexkamera *Canon EOS 40D*. Um im Ergebnis eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, werden alle Proben vor und nach einem Nachbehandlungsschritt unter gleichen Lichtverhältnissen und Kameraeinstellungen fotografiert. Zusätzlich wird innerhalb einer Serie immer eine Referenzprobe erfasst.

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe der Software Adobe Photoshop CS 5 WIN [197]. Die Daten werden im Rohformat betrachtet, um weitere Einflüsse ausschließen zu können. Da die softwareseitigen Features lediglich eine Analyse einzelner Pixel zulassen und einzelne Flächen auf Grund der Lichtverhältnisse unterschiedliche Tönungen aufweisen, werden fünf Messpunkte definiert und der arithmetische Mittelwert der jeweiligen Lab-Werte gebildet.

4.3 Überblick über die statistische Versuchsplanung und deren Einsatzfähigkeit

Zur Ermittlung der Reaktion einer Produktleistung in Abhängigkeit von definierten Verfahrensparametern sind experimentelle Untersuchungen erforderlich, aus denen sich diese Aussagen interpretieren und folglich Optimierungsstrategien erarbeiten lassen. Dabei stellt der Versuchsplan das Bindeglied zwischen der Hypothese und dem Versuchsaufbau dar und ist definiert als die Gesamtheit aller Aktivitäten zur methodischen Planung und Durchführung von Versuchen sowie der Auswertung und Verifizierung der Versuchsergebnisse im Rahmen der statistischen Versuchsmethodik [222]. Das Ziel der statistischen Versuchsplanung besteht in der Planung und Durchführung von möglichst wenigen Versuchen, mit denen möglichst viele Informationen gewonnen werden können und diese so zu gestalten, dass sie optimal sind [223]. Durch die gezielte Steuerung der Faktoren wird durch den Einsatz statistischer Analysemethoden der Einfluss der Parameter auf die Zielgröße festgestellt.

In Abhängigkeit des aufzustellenden Modells, der verfolgten Ziele sowie eventuell vorhandener Einschränkungen bei der Versuchsdurchführung stehen verschiedene Feldkonstruktionen zur Verfügung. Kleppmann unterscheidet hier zwischen insgesamt drei Stufen der statistischen Versuchsplanung - den *Vorüberlegungen*, in denen die Anzahl der Faktoren zunächst auf weniger als Zehn verringert wird, dem *Screening* sowie der *Optimierung* [224].

Die den Stufen untergeordneten Versuchspläne unterscheiden sich maßgeblich in ihrem Versuchsaufwand und dem daraus resultierenden Zeitaufwand, Kosten und Informationsgehalt. Eine Klassifizierung wird in der Regel über die Auflösung des Versuchsplans durchgeführt. Dabei wird durch das Konzept der Auflösung (eng. *Resolution*) die Vermengungsstruktur bewertet. Gemäß Tabelle 4-3 lässt sich identifizieren, welche Arten von Effekten miteinander vermengt sind und welche nicht mit einbezogen werden. Es wird zwischen Haupteffekt (HE) und Faktor-Wechselwirkungseffekt (FWE) unterschieden. Durch die Reduktion des Versuchsaufwandes und damit der Auflösung besteht die Gefahr fundamentale Erkenntnisse nicht zu gewinnen, da sich Wechselwirkungen höherer Ordnung mit anderen Effekten vermengen und daher nicht mehr voneinander unterschieden werden können. So sind Versuchspläne mit einer Auflösung von III dicht besetzt und nur zum Screening akzeptabel. Ein Feld der Auflösung IV ist geeignet, um Haupteffekte sicher zu bestimmen. Zweifachwechselwirkungen lassen sich jedoch nicht eindeutig zuordnen. Ein Feld der Auflösung V kann ohne Schwierigkeiten ein lineares Beschreibungsmodell versorgen, während Haupteffekte und Zweifachwechselwirkungen bei höheren Auflösungen praktisch unvermengt sind. Ob alle drei Stufen der Modellbildung durchlaufen werden oder ob bereits zwei Stufen bzw. eine Stufe ausreichen, ist abhängig von der Anzahl der identifizierten Einflussgrößen und dem Ziel der Untersuchung.

Tabelle 4-3 - Auflösung von Versuchsplänen, in Anlehnung an [225]

Auflösung	Unvermengt	Berechenbar	Vernachlässigt	Vermengt
III	HE von HE	HE	2 FWE und höhere	HE mit 2 FWE
IV	HE von 2 FWE	HE	3 FWE und höhere	HE mit 3 FWE, 2 FWE mit 2 FWE
V	2 FWE von 2 FWE	HE, 2 FWE	3 FWE und höhere	HE mit 4 FWE, 2 FWE mit 3 FWE
VI	2 FWE von 3 FWE	HE, 2 FWE	4 FWE und höhere	HE mit 5 FWE, 2 FWE mit 4 FWE, 3 FWE mit 3 FWE
VII	3 FWE von 3 FWE	HE, 2 FWE, 3 FWE	4 FWE und höhere	HE mit 6 FWE, 2 FWE mit 5 FWE, 3 FWE mit 4 FWE

4.3.1 Screening

Screening-Versuchspläne haben die Aufgabe, bei minimalem Informationsverlust mit möglichst geringem Versuchsaufwand auszukommen und die Liste der potentiellen Einflussfaktoren zu verringern, um anschließende Hauptuntersuchungen effektiver zu machen [226] [227]. Reduziert wird der Versuchsaufwand dadurch, dass lediglich die Einflussfaktoren, nicht aber die Wechselwirkungen untereinander betrachtet werden. Grundsätzlich handelt es sich hierbei also um ein lineares Gleichungssystem, vergleiche Formel 4-10, welches durch die Tatsache, dass jeder Versuch eine Gleichung liefert, weiter verfeinert werden kann.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^L \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j < i}^L \beta_{ij} \cdot x_j \cdot x_i + \theta \quad \text{Formel 4-10}$$

Prinzipiell kommen *vollständige* und *fraktionelle faktorielle* Versuchspläne zum Einsatz. Bei ersteren werden die Faktoren auf zwei Faktorstufen untersucht. Bei K Faktoren ergeben sich somit 2^K Versuchskombinationen, es werden sämtliche Faktoreffekte und 2-Faktor-Interaktionen unabhängig voneinander analysiert. Um den Versuchsaufwand bei erhöhter Faktoranzahl zu minimieren, können durch eine fraktionelle faktorielle Versuchsplanung höhere Wechselwirkungen mit weiteren Faktoren vermengt werden. Die Anzahl der Faktorstufenkombinationen bleibt unverändert, während sich die Anzahl der Faktoren zu Lasten der

Auflösung erhöht. Eine Alternative stellen Plackett-Burmann-Versuchspläne dar, die sich aus vorher genannten 2^{K-p} -Plänen ableiten.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden die Matrixexperimente von G. Taguchi genutzt, die von einem möglichst minimalen Versuchsaufwand ausgehen. Taguchi greift dazu auf eine Liste von Versuchsplänen zurück, in denen insgesamt 18 orthogonale Felder standardisiert sind [228]. Für zweistufige Faktoruntersuchungen sind dies fraktionelle faktorielle und Plackett-Burmann-Pläne. Reine mehrstufige Faktoruntersuchungen sind auch als Hyper-Griechisch-Lateinische Quadrate bekannt. Die orthogonalen Felder werden durch das Kurzzeichen $L_n(S^K)$ gekennzeichnet, wobei hier die Anzahl der Experimente (n), die Anzahl der Faktorstufen (S) und die Anzahl der Faktoren (K) in dem Feld der Matrix angegeben werden. Prinzipiell werden bei Taguchi zwischen Steuerfaktoren, welche im Prozess auf einen bestimmten Wert eingestellt werden können, und Rauschfaktoren, welche zwischen den Prozessen zwar eingestellt werden können, das Ergebnis allerdings unabhängig von ihrem Wert sein sollte, unterschieden. Ziel ist es, die Steuerfaktoren so einzustellen, dass die Rauschfaktoren einen möglichst geringen Einfluss ausüben und somit einen robusten Prozess einzustellen.

4.3.2 Optimierung

Innerhalb der Optimierungsphase soll ein Minimum oder Maximum der Zielgröße gefunden werden. Eine lineare Modellform ist hier nicht mehr ausreichend, neben den linearen Gliedern müssen auch die quadratischen Regressoren berücksichtigt werden, vergleiche Formel 4-11.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^L \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{i < j}^L \beta_{ij} \cdot x_j \cdot x_i + \sum_{i=1}^L b_{ii} \cdot x_i^2 \quad \text{Formel 4-11}$$

Zur Beschreibung nichtlinearer Abhängigkeiten der Zielgröße von einer Anzahl von Faktoren steht eine Reihe von Versuchsplänen zur Verfügung, wobei diese mindestens drei Faktorstufen enthalten. Zentral zusammengesetzte Versuchspläne bauen auf einem zweistufigen Versuchsplan auf und setzen sich aus vollständig faktoriellen bzw. unkritischen fraktionellen faktoriellen Würfelpunktversuchen mit einer Mindestauflösung von V , den Sternpunktversuchen und mindestens einem Zentralpunktversuch zusammen. Zusammenhänge sind nur innerhalb des untersuchten Bereichs gegeben, eine Extrapolation ist nicht zulässig. Optimale sowie Box-Behnken-Versuchspläne gewährleisten einen breiteren Vertrauensbereich, sind allerdings nicht orthogonal und werden nur in Ausnahmefällen eingesetzt.

Analog zur Beschreibung eines linearen Modells werden innerhalb von 3^K -Versuchsplänen sämtliche Faktorkombinationen untersucht, d. h. neben den Eckpunkten werden auch Kantenmittelpunkte, Seitenmittelpunkte sowie der Mittelpunkt des Versuchswürfels untersucht. Zur Kompensation der unter Umständen sehr hohen Anzahl an Einzelversuchen können auch hier 3^{K-p} -Pläne eingesetzt werden, wobei der Einsatz auf Grund der Vermengung für quantitative Faktoren nicht empfehlenswert ist.

4.4 Vorgehensweise bei der Auswertung

Nach Durchführung der experimentellen Versuche erfolgt die Auswertung durch mathematische Verfahren der Statistik. So sollen zum einen Aussagen über die Streuung der experimentellen Versuchsergebnisse getroffen werden, zum anderen wird die Qualität des Ver-

suchsplans mathematisch hinterfragt. Dabei wird maßgeblich die Wirkung jeder Faktoränderung auf die Versuchsergebnisse analysiert. Statistische Auswerteverfahren sind in der Literatur bereits vielfach behandelt, jedoch soll an dieser Stelle auf die entscheidenden Verfahren noch einmal hingewiesen werden.

4.4.1 Wirkungsanalyse

Die Auswertung der Matrixexperimente nach Taguchi erfolgt zunächst durch die Mittelwertanalyse (engl. *ANOM = Analysis of Mean*), um die durchschnittliche Wirkung der definierten Einstellparameter der Stellgrößen zu berechnen. Explizit erfolgt die Betrachtung der Rauschfaktoren, welche als Störgrößen interpretiert werden, also als die Regelabweichung des tatsächlich (gemessenen) Wertes der Regelgröße von dem definierten Sollwert. Die ermittelte Regeldifferenz bzw. Streuung wird nach Taguchi als Qualitätsverlust ausgedrückt und lässt sich in Anlehnung an die definierte quadratische Qualitätsverlustfunktion so weit reduzieren, dass der Qualitätsverlust im Wesentlichen nur noch durch die Varianz bestimmt wird, welche im Zuge einer Optimierung reduziert werden kann. Aus diesen Annahmen wird weiter das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) eingeführt, welches als Maß der Streuung definiert ist und sich aus numerischen Gründen aus dem reziproken Ausdruck μ^2/σ^2 zusammensetzt. Dabei gibt der *Mittelwert* μ die Wirkung der Stellgröße und die *Varianz* σ die Wirkung der Störgröße an. Somit entspricht die Maximierung des Signal-Rausch-Verhältnisses der Minimierung des Qualitätsverlustes und wird, wie in Formel 4-12 dargestellt, ausgedrückt. Die Logarithmierung dient dabei der Glättung der Wirkung, der willkürlich gesetzte Faktor 10 wiederum der Verstärkung der Wirkung [229].

$$S/N = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \quad \text{Formel 4-12}$$

Die Ermittlung der Kenngröße S/N und damit der Zielfunktion ergibt sich aus der Charakteristik des Qualitätsmerkmals bzw. dem formulierten Optimierungsproblem. Ist das zu untersuchende Qualitätsmerkmal stetig, nicht negativ und der Idealwert Null, wird das Minimierungsproblem nach Formel 4-13 eingesetzt. Es können alle Werte zwischen 0 und ∞ erreicht werden. Auch innerhalb des Maximierungsproblems gemäß Formel 4-14 ist das Qualitätsmerkmal stetig und nicht negativ. Es können alle Werte zwischen 0 und ∞ erreicht werden, der Idealwert ist hier allerdings so groß wie möglich. Bei vorzeichencharakterisierten Problemen, in denen das Qualitätsmerkmal sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann, wird auf das in Formel 4-15 beschriebene Signed-Target-Problem zurückgegriffen. Der Zielwert für das Qualitätsmerkmal beträgt hier Null.

$$S/N_{min} = -10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right] \quad \text{Formel 4-13}$$

$$S/N_{max} = -10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} \right] \quad \text{Formel 4-14}$$

$$S/N_{st} = -10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \right] \quad \text{Formel 4-15}$$

Nach der Ermittlung der S/N-Werte wird der arithmetische Gesamtmittelwert über sämtliche Beobachtungswerte nach Formel 4-16 ermittelt. Dieser gibt die mittlere Streuung aller Messwerte um den Mittelwert an.

$$\overline{S/N}_\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S/N)_i$$

Formel 4-16

Die Wirkung einer Faktorstufe ist weiter die mittlere Abweichung, die die Faktorstufe vom Gesamtmittelwert verursacht und erfolgt durch die Bildung des Mittelwerts der Zielfunktionen, in die die jeweiligen Faktorstufen eingehen, vergleiche Formel 4-17.

$$\overline{S/N}_{xi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S/N_n$$

Formel 4-17

Die jeweiligen Einzelwirkungen werden sowohl in Reaktionstabellen eingetragen als auch mit Hilfe von Effektdiagrammen graphisch dargestellt. Die optimale Faktoreinstellung ist gegeben, wenn die Wirkungsfunktion ein Extremum einnimmt. Genauer steigen die Qualitätsverlustfunktionen des Minimierungs- und Maximierungsproblems mit zunehmender Qualität. Zudem können Rückschlüsse auf die Bedeutung des Faktors in Bezug auf seine Wirkung gezogen werden. Eine hohe Spannweite lässt auf eine starke Wirkung schließen. Eine kleine Spannweite weist dementsprechend auf eine geringe Wirkung hin. Herauszustellen ist, dass mit dem betrachteten Verfahren lediglich Optimierungsrichtungen für die Faktoren bestimmt werden können.

4.4.2 Varianzanalyse

Das Prinzip der Varianzanalyse (eng. *ANOVA = Analysis of Variance*) besteht darin, über die Fehlerquadratsumme eine äquivalente Varianzzerlegung durchzuführen. Das Ziel besteht zum einen darin abzuleiten, ob Effekte einzelner Faktoren für eine Zielfunktion signifikant oder zufällig sind und zum anderen die Anteile einzelner Faktoren an der Gesamtvariabilität abzuschätzen [228]. Dabei werden die vorher ermittelten Wirkungen der Faktoren auf die Wirkungsfunktion S/N detailliert quantifiziert. Die Beobachtungsdaten entspringen einer Grundgesamtheit, Abweichungen innerhalb der Mittelwerte der Faktoren können somit dem Zufall zugeordnet werden. Die Varianzanalyse wird nach einem standardisierten Verfahren schematisch durch die folgenden Schritte durchgeführt:

1. Berechnung der quadrierten Gesamtsummenabweichung.
2. Berechnung der quadrierten Abweichung zwischen den Faktoren.
3. Berechnung der quadrierten Abweichungen innerhalb der Faktoren.
4. Berechnung der mittleren quadrierten Abweichungen.
5. Bestimmung und Vergleich der kritischen F-Werte (Fischerwerte).
6. Erfassung der prozentualen Bedeutung des Faktors.

Die in Schritt 1 errechnete quadrierte Gesamtsummenabweichung SS_t wird durch die in den folgenden Schritten 2 und 3 aufgeschlüsselten Faktoreffekte SS_b und Zufallseffekte SS_w gebildet. Diese werden weiter ins Verhältnis der jeweiligen Anzahl der Freiheitsgrade gesetzt, wodurch sich die mittleren quadratischen Abweichungen (eng. *mean square residuals*) ergeben. Durch die Ermittlung der Fischerwerte F_x sowie deren Vergleich mit tabellarischen Schwellenwerten wird die Signifikanz eines jeden Faktors sowie des Modells überprüft. Durch das Verhältnis zwischen der quadrierten Abweichung des jeweiligen Faktors und der totalen Fehlerquadratsumme wird die prozentuale Bedeutung des Faktors abgeschätzt.

In der Statistik wird allgemein von einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ausgegangen. Innerhalb der Varianzanalyse wird dies durch die Signifikanz p ausgedrückt. Ein Faktor wird

dabei für einen Wert kleiner als 0,05 als signifikant, kleiner als 0,001 als höchst signifikant und größer als 0,05 als nicht signifikant gewertet.

4.4.3 Regressionsanalyse

Zur Vorhersage des Verhaltens realer Systeme unter definierten Einflüssen bietet die Mathematik Regressionen an. Das Modell soll hierbei ein hinreichend genaues bestimmtes Verhalten zwischen den Einflussgrößen X_i und der Zielgröße y_j abbilden. Gemäß Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 sind hier bewährte Modellansätze eine lineare Form, ein lineares Modell mit Wechselwirkung sowie ein quadratisches Modell mit Wechselwirkung.

Der in den Ansätzen eingehende Koeffizient β wird aus den Versuchsdaten ermittelt. Nicht signifikante Einflussfaktoren werden im Zuge der Varianzanalyse ausgeschlossen.

4.5 Kontrollverfahren / Bewertung der Ergebnisse

Die eingesetzten Beschreibungsmodelle der statistischen Versuchsplanung bauen auf Regressionsverfahren auf, deren korrekte Anwendung durch diverse Kontrollverfahren sichergestellt werden kann. Die zum Einsatz kommende Software *Stat-Ease Design Expert* bietet hier eine Reihe von numerischen und grafischen Tools.

Zum einen erfolgt die Modelldiagnose mit Hilfe der Residuen, also der Abweichung $y_i - \hat{y}_i$ der Messwerte von der Regressionsgeraden. Jede systematische Abweichung zwischen dem Versuchsergebnis und der Vorhersage ist nicht mit der Normalverteilung erklärbar und wird mit Hilfe von Residualplots dargestellt. Unterschieden wird zwischen der Darstellung *predicted vs. actual*, in der die Vorhersage den gemessenen Werten gegenübergestellt wird, und der Darstellung *residual vs. run*, in der die Abweichung in der Reihenfolge der Versuche aufgetragen wird.

Zum anderen wird durch Löschiagnosen beurteilt, wie stark die Versuche das gesamte Ergebnis beeinflussen. Innerhalb des DFFITS (*difference in fits*) Plot wird die Veränderung einer Vorhersage ohne entsprechenden Messwert gemacht. Liegt der Messwert außerhalb der 3,5-fachen Standardabweichung, liefert das Modell ohne selbigen eine genauere Voraussage. Im Gegensatz dazu wird durch die Cook-Distance der Einfluss aller Ergebnisse auf die Vorhersage ausgewertet. Ausreißer sind durch das Quadrieren und Aufsummieren der Differenz zwischen Vorhersage mit und ohne Punkt deutlicher zu erkennen und werden ab einem Wert von 1 als kritisch angesehen.

Weiter erfolgt eine Bewertung der Regressionsgleichung auf Basis des multiplen Bestimmtheitsmaßes. Ausgangspunkt ist die Zerlegung der Summe der quadrierten Abweichungen (Gesamtvarianz) in die erklärte und nicht erklärte Varianz. Dabei gibt das Bestimmtheitsmaß den Anteil der erklärten Abweichung an der Gesamtvarianz an, dessen Wertebereich zwischen Null und Eins liegt, vergleiche Formel 4-18. Ein Wert von Eins gibt an, dass sich die Regressionsfunktion zu 100 % an die empirisch ermittelten Messwerte anpasst.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Formel 4-18

Durch die Zunahme der Variablenzahl steigt in der Regel der Anteil der erklärten Varianz, mit der Folge einer sinkenden Vorhersagegenauigkeit. Durch die Einführung des *adjustierten Bestimmtheitsmaßes* gemäß Formel 4-19 wird die Anzahl der Faktoren im Modell mit berücksichtigt.

$$R_{adj.}^2 = 1 - \frac{n_d - 1}{n_d - p_v} \cdot (1 - R^2)$$

Formel 4-19

Durch die Zuhilfenahme des *Predicted Sum of Squares* (PRESS) wird nach Formel 4-20 das *vorhersagende Bestimmungsmaß* R_{pred}^2 eingeführt und gibt Aufschluss über die Wichtigkeit eines Faktors. Dieser Wert sollte möglichst nahe an $R_{adj.}^2$ platziert sein, um eine gute Modellbildung zu garantieren.

$$R_{pred.}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Formel 4-20

5 QUALIFIZIERUNG DER PROZESSPARAMETERFÜHRUNG LASERGESINTERTER BAUTEILE AUS POLYPROPYLEN

Die Ausführungen in Kapitel 2 zeigen, dass sich der Laser-Sinterprozess durch eine Vielzahl von Stell- und Regelgrößen auszeichnet. Resultierend aus dieser Komplexität hängt die optimale Einstellung zur Verarbeitung des jeweiligen Werkstoffs nach wie vor von den Erfahrungen des Maschineneinrichters ab. Auf Grund der eingeschränkten Werkstoffpalette beruht das aktuelle Prozessverständnis primär auf dem Umgang mit dem Standardwerkstoff PA 12. Die angestrebte quantitative Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Maschinenparametern und definierten Qualitätsmerkmalen für den Werkstoff Polypropylen nutzt diese validierten Erkenntnisse und wird anhand von experimentellen Versuchen durchgeführt.

Dazu werden in Kapitel 5.1 zunächst Untersuchungen des Werkstoffes Polypropylen hinsichtlich des Schmelz- und Kristallisationsverhaltens, der Schmelzeviskosität, der Schüttguteigenschaften sowie der chemischen Beständigkeit durchgeführt. Dabei werden Referenzmessungen mit dem Standardwerkstoff PA 12 durchgeführt, um im Ergebnis Hinweise zu bekommen, welche Unterschiede bei der Bearbeitung beider Werkstoffe mittels Laser-Sintern zu erwarten sind. Weiter soll hier eine qualifizierte Aussage über die Eignung zur Verarbeitung von Polypropylen getroffen werden.

Die Qualifizierung sowie die Optimierung der ausgewählten Bauteileigenschaften erfolgt auf dem Anlagensystem Formiga P 100 und gliedert sich in dieser Arbeit in zwei Teile. Zunächst werden in Kapitel 5.3 breit aufgestellte Untersuchungen (Screening Experimente) durchgeführt, um aufbauend zum Stand der Technik die Haupteinflussgrößen bei der Verarbeitung des Werkstoffes Polypropylen zu identifizieren. Vermeintliche Haupteinflussgrößen werden dann in Kapitel 5.4 herangezogen und zum Aufstellen der Korrelationsmodelle genutzt. Als Zielvorgabe gelten die definierten geometrischen und mechanischen Bauteilkennwerte, welche im Ergebnis durch ein robustes Prozessfenster optimiert werden sollen. Ziel ist hierbei die Ermittlung eines unter Produktions- und Qualitätsbedingungen optimalen Arbeitspunktes.

5.1 Ausgangsmaterial Polypropylen

Der Werkstoff Polypropylen kann nach Bild 2-1 der Gruppe der Standardkunststoffe zugeordnet werden und gehört mit einem kristallinen Anteil von 50 bis 70 % der Familie der teilkristallinen Thermoplaste an [230]. Die Kristallisationsfähigkeit und der Kristallisationsgrad werden maßgeblich durch die Taktizität der molekularen Kette bestimmt. Dabei können die Methylgruppen des Propylens räumlich unterschiedlich angeordnet sein. In Abhängigkeit einer isotaktischen (einseitige Konfiguration der Methylgruppen), syndiotaktischen (alternierende Konfiguration) oder ataktischen (unregelmäßige Konfiguration) Anordnung ergibt sich

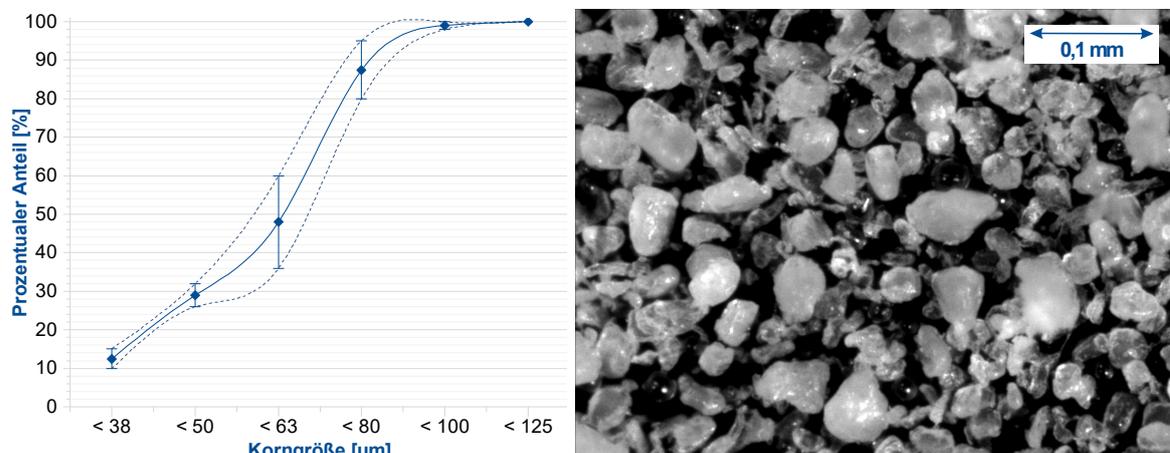
eine große Spanne des Eigenschaftsprofils. Im Allgemeinen ähnelt Polypropylen dem Werkstoff PE-HD, verhält sich unterhalb von 0 °C allerdings fester, biegesteifer, härter und schlagempfindlicher [10]. Die Einsatzgrenzen belaufen sich auf 0 bis 100 °C Dauertemperatur, kurzfristig ist eine Nutzung bis 150 °C möglich [230]. Bei höheren Temperaturen neigt Polypropylen allerdings zur Oxidation und muss deswegen dauerhaft stabilisiert werden. Neben der für Polypropylen typischen Eigenschaft der geringen Dichte sind gute mechanische Eigenschaften bis dicht an den Schmelzpunkt zu beobachten. Weiter ist Polypropylen geruchslos, durchsichtig bis opak, sterilisierbar und wasserabweisend, allerdings nicht aromatisch und zeichnet sich neben guten, von der Frequenz unabhängigen, dielektrischen Eigenschaften durch eine hohe chemische Beständigkeit aus. Auf Grund der Hydrophobie von Polypropylen hat es einen Vorteil gegenüber polyamiden Kunststoffen und besitzt somit eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme und kann dadurch auch bei korrosionsbegünstigenden Bedingungen eingesetzt werden.

Die Haupteinsatzgebiete von Polypropylen sind sehr unterschiedlich und gehen von gesundheitstechnischen Artikeln bis hin zum (Lebensmittel-)Verpackungsbereich. Durch neue verarbeitungsfreundliche Varianten mit verbesserten Zähigkeits-, Festigkeitsverhältnissen wird Polypropylen zunehmend im Automobil- und Konsumbereich eingesetzt.

▪ Schüttguteigenschaften

Die Prozessführung und letztendlich die Qualität lasergesinterter Bauteile wird maßgeblich von der Rieselfähigkeit, also dem Fließverhalten sowie der Verdichtbarkeit des pulverförmigen Ausgangswerkstoffs bestimmt. Diese prägen zum einen das Pulverauftragsverhalten und zum anderen die Packungsdichte im Pulverbett. Die Fließeigenschaften eines Schüttgutes werden von verschiedenen Parametern wie der Feststoffdichte, Partikelgrößenverteilung, der mittleren Partikelgröße, der Partikelgeometrie sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Partikel beeinflusst.

Die Charakterisierung der Korngrößenverteilung durch die Siebanalyse nach DIN 53735 ist in Bild 5-1 a) dargestellt. Es zeigt sich, dass das Ausgangsmaterial im Wesentlichen durch die Partikelgrößenfraktion im Bereich von etwa 53 µm bis 85 µm bestimmt wird. Dabei beträgt die mittlere Partikelgröße in etwa 60 bis 65 µm. Weiter ist ein Anteil von 10 bis 15 % von Partikeln zu beobachten, deren Durchmesser < 38 µm beträgt. Damit weist Polypropylen grundsätzlich eine ähnliche bimodale Verteilungscharakteristik wie PA 12 auf, jedoch liegt die mittlere Partikelgröße von PA 12 im Gegensatz zu PP mit einer Reichweite von 50 bis 60 µm um ca. 12 % niedriger [231].



a) Siebanalyse (Alpine Luftstrahlsieb (DIN 53734) mit 20 g, 3 min, 5000 pas.) b) Mikroskopieaufnahme von unversinterter Pulver

Bild 5-1 - Korngrößenverteilung von Polypropylen

Weitere Unterschiede ergeben sich bei der Betrachtung der Partikelgeometrien, siehe Bild 5-1 b). Während der durch Sprühtrocknung hergestellte Standardwerkstoff PA 12 insgesamt durch einen hohen Anteil sphärischer Partikel geprägt ist, entstehen bei der Herstellung von Polypropylen maßgeblich kantige Partikel. Die Geometrie variiert relativ stark, so sind teils nadel- und plattenförmige, vereinzelt aber auch runde Partikel zu beobachten. In Kombination mit der größeren mittleren Partikelgröße entsteht durch die kantige Form der Partikel ein relativ gesehen großer Hohlraumanteil des Schüttguts. Im Ergebnis lässt sich für den Ausgangswerkstoff Polypropylen nach DIN EN ISO 60 eine Schüttdichte von $0,35 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ ermitteln, welche aus genannten Gründen um 18,60 % geringer ist als von PA 12 ($> 0,43 \text{ g/cm}^3$) [28], [33].

Da zum Erreichen einer hohen Packungsdichte maßgeblich das Fließverhalten verantwortlich ist, wurde in Anlehnung an die VDI 3405 [40] weiter die Hausner-Zahl H_R ermittelt. Diese setzt sich aus dem Quotienten aus Stampfdichte ρ_0 und der Schüttdichte ρ_∞ zusammen und stellt ein Maß für die Fließfähigkeit von Pulvern dar. Eine Hausner-Zahl von $H_R = 1$ wird erreicht, wenn sich das Schüttgut nicht verdichten lässt - dies entspricht der besten Fließfähigkeit. Der ermittelte Hausner-Wert von $H_{R_NP} = 1,26$ für Polypropylen im Neupulverzustand stellt nach Ortega-Rivas [232] die Grenze zwischen einer guten und einer reduzierten Fließfähigkeit dar. Bei der Betrachtung von aufbereitetem Pulver zeigt sich, dass die Hausner-Zahl in Abhängigkeit vom Alterungszustand kontinuierlich ansteigt. So wird für Pulver, welches einen Bauprozess durchlaufen hat, ein Hausner-Wert von $H_{R_1BP} = 1,29$ und für zweifach genutztes Pulver ein Hausner-Wert von $H_{R_2BP} = 1,31$ ermittelt. Ursachen für das reduzierte Fließverhalten können in der Bildung von Agglomeraten und damit verbunden Veränderungen in der Partikelgrößenverteilung gefunden werden, weswegen ältere Materialzustände im unverdichteten Zustand lockerere Packungen aufbauen und sich damit stärker verdichten. Damit zeigt sich ein grundsätzlich ähnliches Verhalten im Vergleich zu PA 12. Der direkte Vergleich zeigt jedoch eine erhöhte Fließfähigkeit des Standardkunststoffes PA 12 mit einem Hausner-Wert von $H_{R_PA12} = 1,14$ [233]. In Kombination mit der Analyse der Korngrößenverteilung und -geometrie lässt sich somit ein erschwertes Auftragsverhalten des Polypropylenpulvers vermuten.

▪ Thermische Eigenschaften

Grundsätzlich können mit Hilfe des Laser-Sinter-Prozesses alle Materialien verarbeitet werden, die sich im weitesten Sinne thermoplastisch verhalten. Ob sich ein teilkristalliner Thermoplast verarbeiten lässt, hängt von einer Reihe von charakteristischen Werkstoffkennwerten ab. Die wichtigste Anforderung stellt hier das Schmelz- und Kristallisationsverhalten dar [23], [234]. So werden durch eine Erwärmung auf eine Temperatur oberhalb der Kristallisationstemperatur unerwünschte Erstarrungsvorgänge, bei denen Schmelze in Teilen kristallin erstarrt, und unterhalb der Schmelztemperatur Aufschmelzvorgänge, bei denen das viskose Fließen der Schmelze einsetzt, unterdrückt. Erst der Energieeintrag durch den Laser überführt den teilkristallinen Werkstoff in eine metastabile Schmelze, das heißt potentielle kristalline Strukturen lösen sich auf Grund ihrer Instabilität wieder auf. Für die Abschätzung der Verarbeitungstemperaturen im Bauraum der Laser-Sinteranlage wurden Messungen mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) durchgeführt. Innerhalb des thermoanalytischen Verfahrens werden eine Probe und eine Referenzprobe einem identischen, kontrollierten Temperaturprogramm bei definierter Atmosphäre unter Verwendung eines symmetrischen Messsystems ausgesetzt und über die Schmelztemperatur erwärmt und anschließend wieder abgekühlt. Durch die Aufzeichnung der kalorischen Effekte im Vergleich zu der Referenzprobe können auf die Basislinie bezogene endotherme Wärmeströme (bei Erhöhung der Enthalpie) und exotherme Wärmeströme (bei Verringerung der Enthalpie) be-

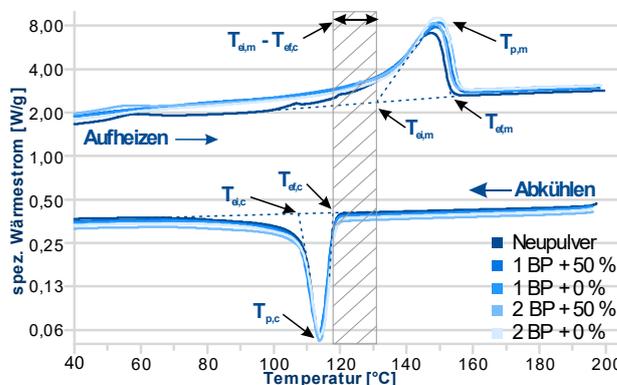
stimmt werden. Die Glasübergangs- ($T_{p,g}$), die Schmelz- ($T_{p,m}$) und die Kristallisationstemperatur ($T_{p,c}$) stellen dabei die höchsten Abstände zwischen der Kurve und der virtuellen Basislinie dar. Die interpolierte oder extrapolierte Anfangs- (T_{ei}) und Endtemperatur (T_{ef}) des endo- bzw. exothermen Peaks ergeben sich durch den Schnittpunkt, der im Wendepunkt des jeweiligen Peaks angelegten Tangente mit der Basislinie liegt. Durch die Integration der Wärmestromkurve in den Grenzen der Anfangs- und Endtemperatur des jeweiligen Peaks errechnet sich nach Formel 5-1 die spezifische Schmelz- (Δh_m) bzw. Kristallisationsenthalpie (Δh_c). [230], [235], [236], [237]

$$\Delta h = \int c_p * dT$$

Formel 5-1

Die Untersuchungen werden mit einem DSC-Gerät vom Typ Mettler Toledo DSC1/700 gemäß DIN EN ISO 113577-1 mit Materialproben verschiedener Alterungsstadien durchgeführt. So wird sowohl Neupulver als auch Altpulver, welches zum einen einmal bzw. zweimal einen Bauprozess durchlaufen hat und zum anderen mit jeweils 50 % Neupulver aufbereitet wurde, untersucht. Die Materialproben mit der Masse von jeweils $m_p = 10 \text{ mg}$ werden unter Stickstoffatmosphäre nach einer Haltezeit von 5 min auf Raumtemperatur auf ca. 40 °C oberhalb von $T_{f,m}$ aufgeheizt, dort erneut gehalten, um die kristallinen Strukturen vollständig aufzuschmelzen und anschließend wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Der Aufheiz- bzw. Abkühlzyklus wird nach DIN EN ISO 11357-3 [237] bei einer Rate von 10 K/min durchgeführt.

Die Wärmestromkurven des Ausgangswerkstoffes Polypropylen in verschiedenen Alterungsstufen sind in Bild 5-2 a) dargestellt. Die in Bild 5-2 b) aufgeführte Tabelle gibt die Onset- und Endsettemperaturen, die Temperaturintervalle für den Schmelz- und Kristallisationsbereich und die Temperaturintervalle zwischen den jeweiligen Schmelz- und Kristallisationsbereichen an. Zunächst zeigt sich, dass die Verläufe des Werkstoffes Polypropylen ein grundsätzlich ähnliches Schmelz- und Kristallisationsverhalten zeigen. Unterschiede ergeben sich maßgeblich bei der Betrachtung der Schmelztemperatur, welche bei einem Neupulverzustand etwa $T_{p,m} = 146 \text{ °C}$ beträgt und mit zunehmenden Alterungszustand steigt. Dies lässt auf eine thermisch bedingte Nachkristallisation des Werkstoffes schließen. Der Vergleich der zum Aufschmelzen benötigten Enthalpie zeigt, dass diese mit erhöhter Pulvernutzung zunimmt. Dies bestätigt die Vermutung des physikalischen Alterungseffektes der Nachpolymerisation. Dementsprechend erhöht sich auch das Temperaturintervall, also letztendlich das Verarbeitungsfenster, zwischen dem Schmelz- und Kristallisationsintervall von 17,34 °C auf bis zu 20,16 °C.



a) Grafische Darstellung der DSC Kurven

Temperatur [° C]	Neu-pulver	1 BP + 50 % NP	1 BP + 0 % NP	2 BP + 50 % NP	2 BP + 0 % NP
$T_{p,c}$	113,97	113,80	113,97	114,47	114,14
$T_{ei,c}$	106,35	105,36	105,66	105,23	106,71
$T_{ef,c}$	119,07	118,92	118,96	119,41	119,14
$T_{ef,c} - T_{ei,c}$	12,72	13,30	13,56	14,18	12,43
$T_{p,m}$	146,63	149,11	148,34	148,68	147,83
$T_{ei,m}$	136,41	139,75	134,10	139,57	137,67
$T_{ef,m}$	152,71	155,15	154,31	154,71	153,61
$T_{ef,m} - T_{ei,m}$	16,30	15,40	20,21	15,14	15,94
$T_{ei,m} - T_{ef,c}$	17,34	20,83	15,14	20,16	18,53

b) Tabellarische Übersicht

Bild 5-2 - DSC von Polypropylen verschiedener Alterungsstufen (NP = Neupulver, BP = Bauprozess)

Der Vergleich zwischen beiden Werkstoffen zeigt, dass sich das Material PA 12 [231] durch

eine engere Peakbreite und höhere Schmelzenthalpie auszeichnet. Durch die sprunghafte Aufschmelzkurve bei $T_{p,m}$ können Sintererscheinungen prinzipiell besser unterbunden werden, da die hierfür benötigte Energie zum Aufschmelzen von kristallinen Strukturen nicht vorhanden ist und ein geringerer Anteil von amorphen Bereichen zu verzeichnen ist. Dem relativ gesehen steiler zulaufenden Schmelzbereich geschuldet, kann bei der Verarbeitung von PP somit von einer geringeren Kantenschärfe ausgegangen werden. Zudem weist die Wärmestromkurve ein um 36,11 % erhöhtes Temperaturintervall auf, welches aus thermischer Sicht zunächst ein ausreichend großes Fenster ist.

Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass das Temperaturintervall jedoch empfindlich von der Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit abhängt [15], [23]. Innerhalb des Laser-Sinterprozesses wird die Pulverbettsoberfläche durch eingesetzte Heizstrahler nahe der Kristallitschmelztemperatur gehalten, wodurch sich sehr geringe Abkühlraten ergeben. Demnach spiegeln die Untersuchungen nach Norm mit einer Standardabkühlrate von 20 K/min bzw. 10 K/min den Laser-Sinterprozess nur bedingt wider. Um den Prozess realitätsgetreuer abzubilden, wurden neben den in der DIN verankerten Aufheiz- bzw. Abkühlraten zusätzlich noch die Abkühlraten 5, 2 und 1 K/min für den Werkstoff Polypropylen im Neupulverzustand genutzt.

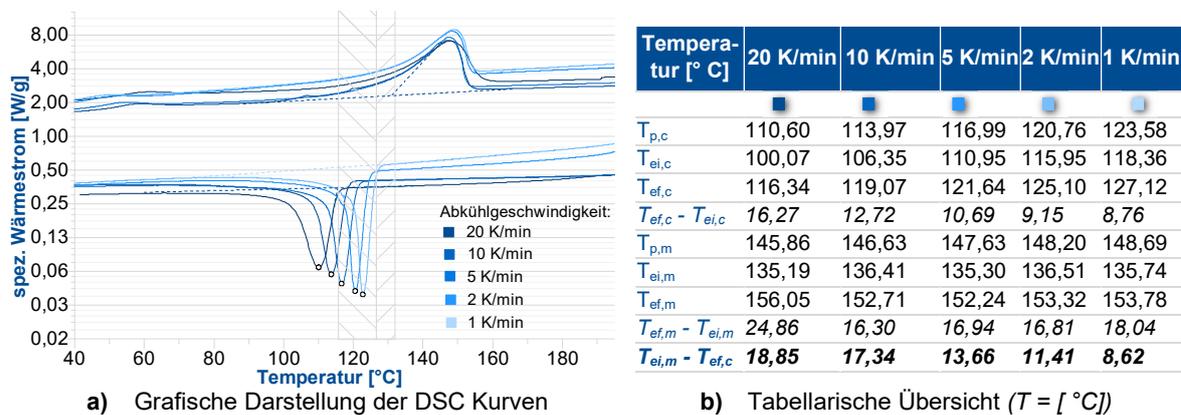


Bild 5-3 - Vergleich verschiedener Heizraten

Gemäß Bild 5-3 zeigt sich, dass die Rekristallisationstemperatur empfindlich von der Abkühlrate abhängt und sich mit langsameren Abkühlraten zu höheren Temperaturen bis zu $T_{p,c,1K/min} = 123,58$ °C verschiebt, die Glockenkurven entwickeln sich mit höheren Raten schmaler und höher. Der daraus resultierende schmale Temperaturbereich von $T_{ei,m} - T_{ef,c} = 8,62$ K wird hier als ein Indikator für eine erschwerte Verarbeitung beim Laser-Sintern interpretiert.

▪ Rheologische Eigenschaften

Neben dem Aufschmelzverhalten des Materials ist die Entstehung einer definierten Schmelzschichtdicke sowie vollständigen Verbindung mit der darunterliegenden Schicht für die resultierenden mechanischen und geometrischen Eigenschaften lasergesinterter Bauteile von entscheidender Bedeutung. Die Viskosität der entstehenden Schmelze ist hierbei eine aussagekräftige Kenngröße und bestimmt neben der Oberflächenspannung des Werkstoffs maßgeblich die Sinterhalsausbildung. Um eine Aussage über die Schmelzeviskosität des Werkstoffs Polypropylen zu erhalten, wird in der VDI 3405 Blatt 1 vorgeschlagen, die zur Viskosität indirekt proportionale Schmelzvolumenfließrate (MVR) heranzuziehen. Dabei haben Untersuchungen gezeigt, dass die Bauteileigenschaften in Abhängigkeit vom eingesetzten Anlagensystem unter einem MVR -Wert von 20 $cm^3/10$ min bzw. 25 $cm^3/10$ min nicht gewährleistet werden können [132], [233].

Zur Charakterisierung und qualitativen Einschätzung der Pulverqualität des Werkstoffs Polypropylen wird die Schmelzvolumenfließrate nach DIN EN ISO 1133-1 erfasst [238]. Für die Durchführung wird das Schmelzindex-Prüfgerät vom Typ *MeltFlow @on* der Firma *Karg Industrietechnik* eingesetzt. Um Einflüsse der Feuchtigkeit zu vermeiden, wird das Pulver zunächst bei 105 °C über 5 min unter Vakuum vorgetrocknet. Anschließend wird das Pulver in einem beheizbaren Zylinder verdichtet und aufgeschmolzen. Die Probenmenge von 4,5 g wird bei einer Prüftemperatur von 230 °C in Anlehnung an DIN EN ISO 1873-1 [239] mit einer Auflast von 2,16 kg aus einer Düse mit einem Durchmesser von 2,095 mm extrudiert. Dabei gibt der MVR-Wert das, unter den oben vorgeschriebenen Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Belastung und geometrischer Eigenschaften des Kolbens und Düse, in einer festgelegten Zeitdauer von zehn Minuten extrudierte Volumen an. Durch Kenntnis der Schmelzdichte bei Prüftemperatur lässt sich der Schmelze-Volumenfließindex bei Bedarf in den Schmelze-Massefließindex überführen.

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Schmelze-Volumenfließrate des eingesetzten Polypropylens sind in Bild 5-4 dargestellt. Gegenübergestellt wurden hier in Analogie zur DSC-Messung zum einen Polypropylen in verschiedenen Alterungsstadien und zum anderen der Vergleich mit dem auf dem Markt befindlichen Standardmaterial PA 12.

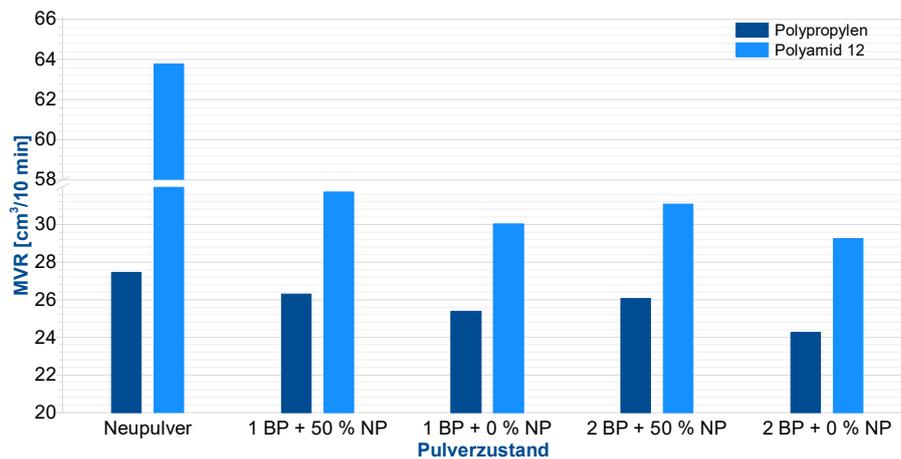


Bild 5-4 - MVR-Messungen verschiedener Alterungsstadien von Polypropylen (*BP* = *Bauprozess*, *NP* = *Neupulver*)

Der MVR-Wert beider untersuchter Materialien nimmt in Abhängigkeit des Alterungszustandes kontinuierlich ab, das heißt, das Fließverhalten ist durch eine mit zunehmendem Alter höherviskose Kunststoffschmelze gekennzeichnet. Insgesamt deckt sich das Verhalten mit bereits durchgeführten Untersuchungsergebnissen beispielsweise von Pham [119], Gornet [120] oder Mielicki [240]. Die starken Viskositätsänderungen werden hier maßgeblich auf Alterungseffekte, wie die Nachpolymerisation und den damit verbundenen Kettenaufbau, die Ausbildung von Agglomerationen aber auch radikalisch induzierten Kettenabbau zurückgeführt. Genauer fällt durch die einmalige Nutzung des PA 12 Pulvers der MVR-Wert um 52,94 % und entwickelt sich mit weiteren Prozessdurchläufen regressiv. Analog dazu reduziert sich der MVR-Wert des Polypropylen-Pulvers um insgesamt 12 %, wobei anzumerken ist, dass sich die Kunststoffschmelze bereits im Neupulverzustand sehr viel viskoser verhält. Das Wiederauffrischen durch Neupulver bringt eine erneute Steigerung mit sich. Jedoch bewegen sich die gemessenen MVR-Werte relativ nahe an zuvor aufgezeigten Grenzwerten, mit denen eine generelle Verarbeitbarkeit gewährleistet ist. Entsprechende Qualitätsempfehlungen können, wenn überhaupt, mit der Nutzung von Neupulver erreicht werden. Im direkten Vergleich zeigt sich hier ein weiteres Indiz für eine erschwerte Verarbeitung.

▪ Chemische Medienbeständigkeit

Die chemische Beständigkeit von Kunststoffen wird durch die DIN 16888 [241] in die drei Klassen *widerstandsfähig*, *bedingt widerstandsfähig* sowie *nicht widerstandsfähig* eingeteilt. Trotz dieser vermeintlich simplen Einteilung ist die Beeinflussung von Kunststoffen durch Wirkmedien äußerst komplex und von einer Reihe von Faktoren abhängig. So bestimmt der morphologische Aufbau - je nach Bildungsreaktion, Anzahl der funktionellen Gruppen der monomere sowie den Reaktionsbedingungen wird zwischen unvernetzten (Thermoplasten), schwachvernetzten (Elastomere) und stark vernetzten (Duroplaste) Polymeren unterschieden - neben den physikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad des Kunststoffes auch die Eindringtiefe des Wirkmediums. Allgemein wird die Beständigkeit so durch steigende Molekülzahl, einen höheren Kristallisations- und zunehmenden Vernetzungsgrad verbessert [242]. Hilfs- und Füllstoffe können zum einen unterstützend für die Beständigkeit gegenüber Chemikalien eingesetzt werden, führen zum anderen im Fall von Weichmacherzusätzen oder niedermolekularen Substanzen zu einer Verschlechterung der Beständigkeit. Weiter hängt das chemische Verhalten der Kunststoffe im Wesentlichen von der chemischen Struktur der Makromoleküle ab. Da die maßgeblichen chemischen und physikalischen Prozesse mit erhöhten Temperaturen schneller verlaufen, nimmt die Beständigkeit bei höheren Temperaturen in der Regel deutlich ab. Gleiches gilt für die Einwirkzeit sowie für die Aggressivität des Mediums. Mit zunehmender Einwirkzeit und einem erhöhten Konzentrationsanteil des Wirkmediums nimmt die Beständigkeit des Kunststoffes ab. Weiter zeigt sich der Kunststoff im belasteten Zustand empfindlicher gegen die Medieneinwirkung, da die resultierenden größeren Zwischenräume innerhalb der Molekülkettenstruktur den Gas- und Flüssigkeitsmolekülen die Möglichkeit geben, sich in eben jenen Zwischenräumen einzulagern.

Der Transportmechanismus von niedermolekularen Substanzen bzw. Lösungsmittelmolekülen wird unter dem Vorgang der Permeation zusammengefasst und erfolgt durch die drei Schritte Adsorption, Diffusion sowie Desorption [243]. Da die Reaktionen in einem heterogenen (*fest/flüssig* oder *fest/gasförmig*) System stattfinden, ist der Verlauf der Reaktion besonders von Diffusionsvorgängen bzw. der Diffusionsgeschwindigkeit geprägt. In Abhängigkeit von der Art der Einwirkung wird allgemein zwischen chemisch und physikalisch aktiven Medien unterschieden. Erstere verursachen schon bei der Sorption an der Kunststoffoberfläche irreversible stoffliche Änderungen in Form von Oxidationen, Kettenspaltungen oder Vernetzungen. Sollte das niedermolekulare Molekül sich lediglich an die Oberfläche des Kunststoffes anlagern (Adsorption), nicht aber in den Kunststoff eindringen, so findet neben der rein physikalischen Anlagerung kein weiterer Stofftransport statt. Die Materialkennwerte bleiben nahezu unverändert. Eine physikalisch verursachte Werkstoffänderung wird dabei auf Grund einer Verringerung der intermolekularen Bindungskräfte und einer damit einhergehenden Steigerung der Molekularbewegung verursacht. Damit finden definitionsgemäß keine stofflichen Veränderungen statt. Theoretisch sind also alle auftretenden Änderungen reversibel [24].

In Abhängigkeit von der Polarität des Kunststoffes, aber auch vom übrigen chemischen Aufbau, resultiert daraus das gegenüber dem physikalisch aktiven Medium unterschiedliche Verhalten. Die schon im Altertum überlieferte Erkenntnis „*Similia similibus solvuntur*“ (*Ähnliches löst Ähnliches*) kann in der Regel eine erste Abschätzung zur chemischen Beständigkeit getroffen werden - polare Kunststoffe werden von polaren Lösungsmitteln beeinflusst; unpolare Kunststoffe dementsprechend von unpolaren Medien.

Die Löslichkeit steigt, je ähnlicher die Wechselwirkungskräfte zwischen den Teilchen des Lösungsmittels und denen des zu lösenden Stoffes sind. Die Größe der Polarität sowohl vom Kunststoff als auch vom Wirkmedium, bzw. der Zusammenhalt des Lösungsmittels,

lässt sich aus der Kohäsionsenergiedichte der einzelnen Substanzen berechnen. Der daraus resultierende Löslichkeitsparameter nach Formel 5-2 stellt eine Bewertungszahl für die Lösungs- und Quellgeschwindigkeit dar. Eine Quellung oder Lösung ist umso effektiver, je näher die Löslichkeitsparameter beider Komponenten beieinander liegen, da Lösemittel mit ähnlichen δ -Werten vergleichbare Wechselwirkungskräfte besitzen. Im Falle von Polypropylen liegt der Löslichkeitsparameter bei $16,5 \text{ (PA)}^{1/2}$.

$$\delta^2 = \varepsilon = \frac{\Delta H_m}{V_m}$$

Formel 5-2

Daraus folgend wird der Einfluss chemischer Medieneinwirkung von Polypropylen durch seinen unpolaren Charakter bestimmt und weist auf Grund seiner Natur als hochmolekularer Paraffin-Kohlenwasserstoff eine hohe Beständigkeit gegen Chemikalien und andere Medien auf [243]. Genauer ist Polypropylen zum einen gegen Chemikalien wie nicht oxidierende Stoffe, Laugen und wässrige Lösungen, zum anderen gegen viele polare Lösungsmittel wie anorganische Säuren, Alkohole, Ester, Ketone oder Detergenzien beständig, aber auch gegen Lebensmittel wie Fruchtsäfte, Milch sowie Öle und Fette. Durch den enthaltenen Wasserstoff in den Kohlenwasserstoffatomen wird Polypropylen neben aliphatischen, aromatischen und Halogen-Kohlenwasserstoffen auch von starken Oxidationsmitteln wie beispielsweise Chlorsulfonsäure, rauchender Schwefelsäure oder konzentrierter Salpetersäure schon bei Raumtemperatur angegriffen [244], [245].

5.2 Verarbeitungsgrenzen des Werkstoffes Polypropylen auf dem Anlagensystem Formiga P 100

Anhand der DSC Analysen kann ein geeignetes Temperaturfenster zur Verarbeitung lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen definiert werden. Auf Grund der Tatsache, dass die Temperaturführung anlagenspezifisch variiert, können erlangte thermoanalytische Erkenntnisse nur bedingt überführt werden. Daher ist es zwingend notwendig, den Verarbeitungsbereich auf dem verwendeten Anlagensystem zu verifizieren.

Ziel der ersten experimentellen Untersuchungen ist es daher, qualitative Aussagen über das Aufschmelzverhalten des Werkstoffes Polypropylen zu treffen und für die vermeintlich relevantesten Prozessparameter kritische Verarbeitungsbereiche zu bestimmen, welche die Fertigung von mechanisch belastbaren Bauteilen garantieren. Hierbei wird auf die etablierte Methode der Pulverqualifizierung von kommerziell erhältlichem PA 12 zurückgegriffen, bei der die Anlage zuallererst soweit erhitzt wird, dass die Oberfläche der obersten Pulverschicht aufschmilzt. Innerhalb der Qualifizierung hat sich gezeigt, dass diese bei einer Temperatur von $148 \text{ }^\circ\text{C}$ aufschmilzt, was sich insgesamt mit den vorher durchgeführten DSC-Messungen und den identifizierten Schmelztemperaturen $T_{p,m}$ deckt, vergleiche Bild 5-2. In einem nächsten Schritt wird die Verarbeitungstemperatur entsprechend um 10 K reduziert. Diese Vorgehensweise birgt jedoch eine Reihe von Unsicherheiten und ist von einer Vielzahl von Faktoren, wie der Streuung zwischen Aufschmelzen und Kristallisation, der Pulverchargenqualität, dem Einsatz von Füllstoffen oder der Schmelzviskosität des Werkstoffes abhängig [15]. Da aus besagten Gründen nicht davon ausgegangen werden kann, dass mit dieser Vorgehensweise ein optimales Temperaturfenster ermittelt wird, werden um den gefundenen Punkt weitere Pulverbetttemperaturen untersucht. Im Detail bedeutet das, dass die Bauraumtemperatur in Intervallschritten von jeweils $0,5 \text{ K}$ nach oben und unten korrigiert wird. Zudem wird der Energieeintrag durch den Laser variiert, um die Schmelzbadausbildung sowie Verzugerscheinung für jede eingestellte Temperatur ermitteln zu können. Hierzu werden Quader mit den Abmaßen $x = 10 \text{ mm}$ $y = 10 \text{ mm}$ $z = 2 \text{ mm}$ mit definierten Parametersätzen belichtet. Die Parameter werden nach der bekannten Energiedichteformel

(vergleiche Formel 2-10) ausgelegt. Die Scangeschwindigkeit $v_{Fläche}$ des Lasers wird zunächst in den Grenzen zwischen 2800 mm/s bis 4600 mm/s variiert, die Laserleistung $P_{Fläche}$ zwischen 9 J/s und 18 J/s und der Spurbabstand Δs innerhalb der Grenzen von 0,18 mm bis 0,26 mm. Damit ergeben sich zunächst Flächenenergiedichten zwischen $0,753 \text{ J/cm}^2$ und $3,571 \text{ J/cm}^2$. Die Belichtung der Kontur wird in der Phase der Qualifizierung gleich den Einstellungen der Füllbelichtung gesetzt. Unmittelbar nach Beendigung der letzten Fertigungsschicht der Würfel wird die Abkühlphase eingeleitet, so dass keine weitere Pulverschicht aufgetragen wird. Die visuelle Bewertung des erstarrten Schmelzbads der jeweiligen Proben erfolgt zum einen durch das Auf- und Durchlicht-Digital-Zoom-Mikroskop Di-Li 2004 der Firma Distelkamp-Electronic. Zum anderen werden die gesinterten Schichten mit einer elektrisch leitfähigen Goldschicht beschichtet und durch ein 3D-Oberflächenmesssystem der Firma Nanofokus fotografisch erfasst. Die Analyse des Aufschmelzverhaltens in Abhängigkeit von der Prozesskammertemperatur und den die Energiedichte bestimmenden Prozessparametern erfolgt durch das Auswerteprogramm $\mu\text{soft analysis}$. Genauer wird der 3D-Kennwert Sz herangezogen, um die Oberflächentopografie des erstarrten Schmelzbads der jeweiligen Probe und damit den Grad der Schichtanbindung zu bewerten.

Es zeigt sich, dass bei einer Prozesskammertemperatur kleiner als $138 \text{ }^\circ\text{C}$ erst ab einem Energieeintrag von $2,941 \text{ J/cm}^2$ erste Schmelzausbildungen zu beobachten sind. Eine Erhöhung des Energieeintrags hat zwar eine Homogenisierung des erstarrten Schmelzbades zur Folge, gleichzeitig sind durch den erhöhten Temperaturgradienten zwischen Schmelzbad und Prozesskammeratmosphäre jedoch ausgeprägte Verzugserscheinungen zu beobachten. Durch Erhöhung der Prozesskammertemperatur verschieben sich erwartungsgemäß zum einen der Mindestenergiebedarf nach unten und zum anderen die kritische maximale Energiemenge, welche durch Verzugserscheinungen geprägt ist, nach oben. Exemplarisch sind die makroskopischen Aufnahmen der Belichtungsreihe (Spurbabstand von $\Delta s = 0,26 \text{ mm}$ und Schichtdicke von $D_s = 0,1 \text{ mm}$) bei einer Temperatur von $T_{PK} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ in Bild 5-5 dargestellt.

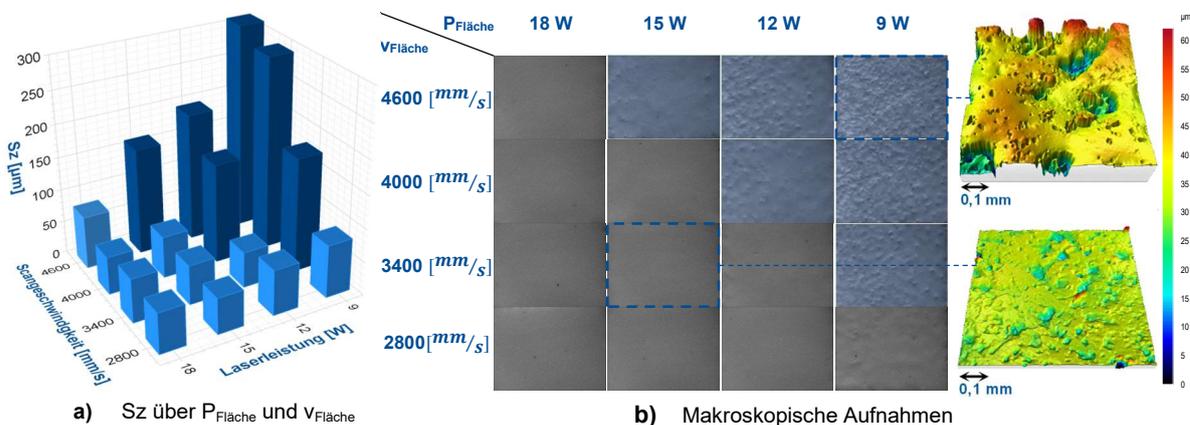


Bild 5-5 - Makroskopische Aufnahmen von Bauteilen, gefertigt mit variierenden Energiedichten

Bereits ab einem Energieeintrag von $0,753 \text{ J/cm}^2$ schmilzt das Pulverbett auf, allerdings ergibt sich kein homogenes Bild. Erst ab einer eingebrachten Energie des Lasers von $1,018 \text{ J/cm}^2$ stellt sich eine minimale Oberflächenrauheit von $Sz = 80,25 \text{ } \mu\text{m}$ ein, welche sich mit Erhöhung von E_A nicht signifikant verbessert. Jedoch ist hier eine horizontale Übersinterung ab einer Energiedichte von $E_A = 3,08 \text{ J/cm}^2$ zu beobachten. Der Effekt des Nachschmelzens verschiebt sich bei höheren Verarbeitungstemperaturen von $T_{PK} = 142,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bis hin zu $E_A = 2,451 \text{ J/cm}^2$. Darüber hinaus ist hier eine starke Rauchentwicklung erkennbar, ein Indiz für den Materialabbau. Eine Überschreitung der Prozesskammertemperatur von $142,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ist durch ein Verschmelzen der obersten Pulverschicht gekennzeichnet, explizit

sind Risse im unversinterten Pulver quer zur Auftragsrichtung erkennbar. Somit ergeben sich die Verarbeitungsgrenzen für den Werkstoff Polypropylen wie folgt:

- Prozesskammertemperatur: $138\text{ °C} < T_{PK} < 142\text{ °C}$
- Flächenenergiedichte: $1,0\text{ J/cm}^2 < E_A < 2,5\text{ J/cm}^2$

5.3 Eingrenzung und Verifizierung der Haupteinflussgrößen

Innerhalb der Qualifizierungsansätze ist es gelungen ein Prozessfenster zur gesicherten Verarbeitung des Werkstoffes Polypropylen auf dem Anlagensystem Formiga P 100 zu finden. Jedoch wurden an dieser Stelle lediglich Betrachtungen zum Aufschmelzverhalten bei verschiedenen Bauraumtemperaturen und Flächenenergiedichten gemacht. Wie innerhalb des Kapitels 2.5 herausgestellt, finden sich weitere kritische Einflussfaktoren auf die Bauteileigenschaften lasergesinterter Bauteile. Durch die hohe Anzahl von potentiellen Einflussfaktoren ist eine vollfaktorielle, wirtschaftliche Auswertung praktisch nicht durchführbar. Zur Aufstellung eines polynomialen Modells, welches zur Optimierung verwendet werden soll und somit mindestens quadratischer Ordnung sein muss, gilt es daher zunächst die wichtigsten Faktoren und Variablen zu identifizieren. Diese Anforderung führt in der Regel zu Experimenten, in denen die (wenigen) Faktoren herausgefiltert werden, die einen tatsächlichen Einfluss auf die definierten Zielgrößen ausüben. Geht man von einer Gesamtliste aller möglichen Einflussfaktoren aus, können diese in drei Gruppen eingeordnet werden: Störgrößen, welche nicht beeinflusst werden können, Faktoren, welche nicht in die Versuchsplanung mit aufgenommen werden und somit konstant gehalten werden müssen und letztendlich Kontrollfaktoren, welche experimentell untersucht und variiert werden sollen [246].

In Anlehnung an bereits durchgeführte Forschungen, siehe Kapitel 2.7.2, wird innerhalb der Arbeit der Einfluss von insgesamt neun Kontrollfaktoren auf die Zielgrößen mechanische Eigenschaften (*E-Modul*, *Bruchdehnung* und *Zugfestigkeit*) sowie geometrische Produktspezifikationen (*arithmetischer Mittenrauwert Ra*, *mittlere Rautiefe Rz* und *Form- und Maßhaltigkeit*) lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen als wichtig eingestuft. Diese lassen sich in die Gruppen Füllbelichtung (*Laserleistung*, *Lasergeschwindigkeit*, *Spurabstand*), Konturbelichtung (*Laserleistung*, *Lasergeschwindigkeit*, *Strahlverschiebung*), Prozesstemperatur (*Prozesskammertemperatur*, *Entnahmekammertemperatur*) sowie die *Schichtstärke* zusammenfassen, vergleiche Tabelle 5-1. Weiter werden für jeden Faktor in den Grenzen des Verarbeitungsfensters vier Faktorstufen definiert.

Tabelle 5-1 - Versuchsplanung zur Eingrenzung und Verifizierung der Einflussfaktoren

	Faktor	Einheit	Stufen	1	2	3	4
A	Prozesskammertemperatur	[°C]	4	139	140	141	142
B	Entnahmekammertemperatur	[°C]	4	80	90	100	110
C	Schichtstärke	[mm]	4	0,08	0,1	0,12	0,15
D	Laserleistung (Füll)	[J/s]	4	10	12	14	16
E	Lasergeschwindigkeit (Füll)	[mm/s]	4	2500	2700	2900	3100
F	Spurabstand (Füll)	[mm]	4	0,22	0,24	0,26	0,28
G	Laserleistung (Kontur)	[J/s]	4	6	8	10	12
H	Lasergeschwindigkeit (Kontur)	[mm/s]	4	2500	2700	2900	3100
I	Strahlverschiebung (Kontur)	[mm]	4	0,06	0,09	0,12	0,15

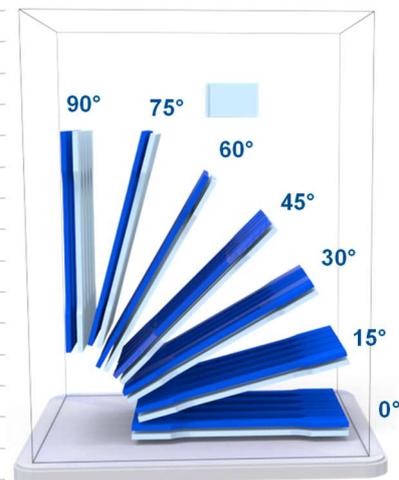
Auf die direkte Analyse des Einflusses von Störgrößen wird verzichtet. Die Experimente werden alle mit Pulver aus der gleichen Pulvercharge unter möglichst gleichen Umweltbedingungen durchgeführt. Des Weiteren ist die Positionierung und Orientierung innerhalb eines jeden Prozesses definiert. Bei der Anordnung der Probenkörper wird darauf geachtet, dass der gesinterte Querschnitt aller Bauteile pro Bauschicht konstant ist, um Einflüsse unterschiedlicher Verweilzeit der Schmelze im Bauraum zu minimieren. Explizit wird die Liste

der genannten potentiellen Einflussfaktoren innerhalb von Matrixexperimenten von Taguchi weiter eingegrenzt. Wechselwirkungen sollen innerhalb der Screening Experimente bewusst nicht betrachtet werden, da der erhöhte Versuchsaufwand an dieser Stelle nicht zielführend ist. Durch die Summe der Freiheitsgrade, welche sich nach folgender Formel 5-3 berechnen, wird der Versuchsumfang, also die Mindestanzahl der Versuche, vorgegeben.

$$\sum F HGs = f_{\mu} + \sum_{i=1}^A (n_i - 1) + \sum f_{AxB} = 1 + 9 * (4 - 1) + 0 = 28 \quad \text{Formel 5-3}$$

Demnach wird für die Experimente das standardisierte orthogonale Feld L_{32} gewählt, welches mit seinen 32 Versuchen eine Untersuchung von einem zweistufigen und neun vierstufigen Faktoren zulässt. Gemäß Versuchsplan können diese in insgesamt 16 Bauprozessen zusammengefasst werden, siehe Bild 5-6.

Prozess	Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
		[°C]	[°C]	[mm]	[J/s]	[mm/s]	[mm]	[J/s]	[mm/s]	[mm]
1	1	139	80	0,08	10	3100	0,22	6	2500	0,06
	2	139	80	0,08	16	3400	0,26	8	3100	0,12
2	3	139	90	0,10	12	3400	0,24	8	2700	0,09
	4	139	90	0,10	14	3100	0,28	6	2900	0,15
3	5	139	100	0,12	14	3700	0,26	10	2900	0,12
	6	139	100	0,12	12	4000	0,22	12	2700	0,06
4	7	139	110	0,15	10	3700	0,24	10	2500	0,09
	8	139	110	0,15	16	4000	0,28	12	3100	0,15
5	9	140	80	0,10	10	4000	0,26	10	2700	0,15
	10	140	80	0,10	16	3700	0,22	12	2900	0,09
6	11	140	90	0,08	12	3700	0,28	12	2500	0,12
	12	140	90	0,08	14	4000	0,24	10	3100	0,06
7	13	140	100	0,15	14	3400	0,22	6	3100	0,09
	14	140	100	0,15	12	3100	0,26	8	2500	0,15
8	15	140	110	0,12	10	3400	0,28	6	2700	0,12
	16	140	110	0,12	16	3100	0,24	8	2900	0,06
9	17	141	80	0,12	12	3700	0,24	6	3100	0,15
	18	141	80	0,12	14	4000	0,28	8	2500	0,09
10	19	141	90	0,15	16	3700	0,26	6	2700	0,06
	20	141	90	0,15	10	4000	0,22	8	2900	0,12
11	21	141	100	0,08	16	3100	0,28	10	2700	0,09
	22	141	100	0,08	10	3400	0,24	12	2900	0,15
12	23	141	110	0,10	14	3400	0,26	12	2500	0,06
	24	141	110	0,10	12	3100	0,22	10	3100	0,12
13	25	142	80	0,15	14	3100	0,24	12	2700	0,12
	26	142	80	0,15	12	3400	0,28	10	2900	0,06
14	27	142	90	0,12	10	3100	0,26	12	3100	0,09
	28	142	90	0,12	16	3400	0,22	10	2500	0,15
15	29	142	100	0,10	16	4000	0,24	6	2500	0,12
	30	142	100	0,10	10	3700	0,28	8	3100	0,06
16	31	142	110	0,08	14	3700	0,22	8	2700	0,15
	32	142	110	0,08	12	4000	0,26	6	2900	0,09

a) L_{32} Versuchsplan nach Taguchi

b) Bauraumdarstellung

Bild 5-6 - Versuchsplanung

Da zu erwarten ist, dass die Orientierung eine herausragende Rolle als Einflussgröße auf die Zielgrößen einnimmt, wird der Prüfkörper PKG_{03} in den Orientierungen 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° und 90° gefertigt. Der zu Erfassung der Oberflächengüte zu fertigende Probenkörper PKG_{02} enthält bereits alle Orientierungsflächen und wird daher lediglich einmal gefertigt.

5.3.1 Mechanische Eigenschaften

Erfasst werden zunächst die Signal/Rausch-Verhältnisse des Zugmoduls, der Zugfestigkeit und der Dehnung bei Zugfestigkeit. Da die Qualitätsmerkmale stetig, nicht negativ und so groß wie möglich sein sollen, erfolgt die Bestimmung der Zielfunktion S/N_i für jeden durchgeführten Prozess durch das Maximierungsproblem nach Formel 4-14. Die Einzelwirkungen jeder Faktorstufe sind in Bild 5-7 dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass innerhalb der Mittelwertanalyse zunächst alle Orientierungen zusammengefasst und als Gesamtes betrachtet werden. Zunächst ist festzuhalten, dass die Effekte aller betrachteten Zielfunktionen einen ähnlichen bzw. identischen Verlauf aufzeigen. Auch die Spannweite der einzelnen Faktoren ist in Relation stets vergleichbar. Die teilweise beträchtlichen Standardabweichungen können als Indiz für einen hohen Einfluss der Bauteilorientierung auf die Prozessparametereinstellung gedeutet werden.

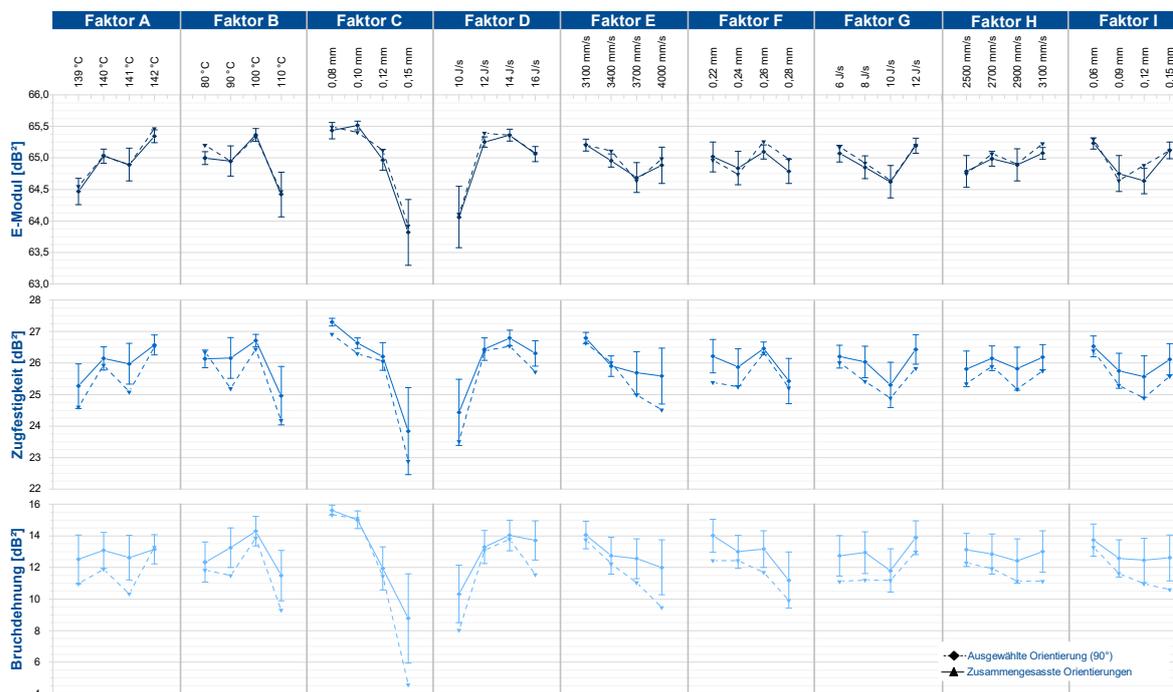


Bild 5-7 - Faktorwirkungsdiagramm für die mechanischen Eigenschaften

Es zeigt sich, dass höhere Prozesskammertemperaturen prinzipiell sowohl die Zugfestigkeit als auch den E-Modul begünstigen. Lediglich die Bruchdehnung zeigt sich relativ unempfindlich gegenüber der eingestellten Prozesskammertemperatur (A). Gleiches gilt für die Entnahmekammertemperatur (B), wobei bei höchster Faktorstufe von $T_{EK} = 110 \text{ °C}$ ein Abfall aller drei Zielgrößen zu beobachten ist. Die höchste Spannweite und damit der vermeintlich höchste Einfluss innerhalb der Faktoreinstellungen ist bei der Schichtstärke (C) zu verzeichnen. Ein Optimum ist demnach bei minimalen Schichtstärken von 0,08 mm bzw. 0,1 mm bei der Betrachtung des E-Moduls erkennbar. Bei einer wirtschaftlicheren Fertigung mit einer Schichtstärke von 0,15 mm fallen sowohl Bauteilfestigkeit als auch Bruchdehnung auf ein Minimum ab. Auch eine erhöhte Laserleistung der Füllbelichtung (D) gewährleistet die Schichtanbindung und damit die mechanischen Eigenschaften bei dicken Schichtstärken nur bedingt. Insgesamt lassen sich durch das Zusammenspiel einer minimalen Schichtstärke sowie eines hohen Energieeintrags maximale Festigkeiten erreichen. Besonders die Bedeutung der Laserleistung innerhalb der Energiedichteformel kann hier als herausragend beschrieben werden, wobei eine zu hoch gewählte Laserleistung zu einem Abfall aller drei

Kennwerte führt. Erklärungen können hier in Abbaumechanismen auf Grund zu hoher Temperaturen gefunden werden. Die Wirkung der Konturbelichtung, zusammengesetzt aus der Leistung des Lasers (G) sowie der Lasergeschwindigkeit (H), ist nach Bild 5-7 im direkten Vergleich vernachlässigbar. Auch über die Wirkung der Strahlverschiebung (I) lässt sich mit Hilfe der Wirkungsanalyse zunächst keine Aussage treffen. Weiter sind die Faktortendenzen für die Orientierung 90° dargestellt (-◆). Unterschiede zur zusammengefassten Mittelwertanalyse ergeben sich primär in der Spannweite der Faktoren Schichtstärke sowie Lasergeschwindigkeit und Spurbelichtung. Bei ersterem ist besonders bei höheren Schichtstärken ein Abfall der mechanischen Eigenschaften zu beobachten. Auch höhere Geschwindigkeiten des Lasers und größere Spurbelichtungen führen auf Grund des verminderten Energieeintrags zu reduzierten Eigenschaften. Grundsätzlich sind jedoch simultane Tendenzen der Faktoreinstellungen aller betrachteten Orientierungen zu beobachten.

Zur quantitativen Abschätzung werden die Messergebnisse durch eine Varianzanalyse nach Kapitel 4.4.2 validiert. Explizit wird die prozentuale Bedeutung eines jeden Faktors durch das Verhältnis der quadrierten Abweichung des jeweiligen Faktors und der totalen Fehlerquadratsumme abgeschätzt. Faktoren mit einer kleinen Gewichtung werden der Fehlervarianz zugeordnet und sind in den folgenden Abbildungen entsprechend gekennzeichnet (-). Weiter lassen sich mit Hilfe der Signifikanzprüfung Varianzunterschiede feststellen und somit hoch (■) und höchst signifikante (■) Faktoren identifizieren, also solche, welche den Prozess zu verändern gestatten und diesen somit bestimmen [228]. Prinzipiell haben eben jene Einflussvariablen kritische Schwellenwerte überschritten. Es ist darauf hinzuweisen, dass die in den folgenden Darstellungen aufgeführten prozentualen Bedeutungen p_x nicht absolut, sondern lediglich in ihrer Tendenz interpretiert werden sollten [228]. Die in Bild 5-8 dargestellten prozentualen Bedeutungen der Faktoren auf die Zielgröße E-Modul zeigen, dass die Schichtstärke unabhängig von der Bauteilorientierung stets höchst signifikant und im Vergleich die größte Bedeutung mit bis zu 45,96 % innehat. Weiter beeinflusst die Laserleistung der Füllbelichtung das Ergebnis maßgeblich. Der Spurbelichtung sowie die konturbestimmenden Belichtungsparameter wurden besonders ab einem Orientierungswinkel von 45° gepooled, also dem Fehleranteil zugeordnet (e1). Die Strahlverschiebung beeinflusst den E-Modul marginal. Auffallend ist der insgesamt relativ hohe Fehleranteil. Gründe können in diesem Zusammenhang zum einen in veränderten Prozessbedingungen, wie beispielsweise Schwankungen in der Materialqualität, gefunden werden. Zum anderen deutet der hohe Fehleranteil darauf hin, dass Faktoren, welche das Ergebnis weiter beeinflussen, besonders sind hier Wechselwirkungen zu nennen, nicht betrachtet wurden.

Faktor	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
A	12,16 %	12,74 %	-	0,18 %	-	2,54 %	4,97 %
B	0,38 %	3,70 %	7,63 %	8,96 %	1,61 %	5,35 %	4,99 %
C	37,95 %	37,21 %	45,96 %	34,84 %	24,74 %	39,23 %	36,62 %
D	12,82 %	17,65 %	18,56 %	27,66 %	12,97 %	21,75 %	23,87 %
E	5,24 %	5,94 %	7,70 %	-	-	-	-
F	2,56 %	2,65 %	5,52 %	-	-	-	-
G	-	12,28 %	2,71 %	-	-	-	0,17 %
H	2,46 %	-	-	-	31,32 %	-	-
I	4,16 %	-	0,88 %	-	0,32 %	1,68 %	0,99 %
e1	22,27 %	7,83 %	11,04 %	28,36 %	29,04 %	29,45 %	28,39 %

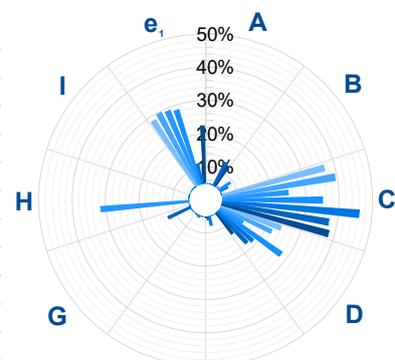
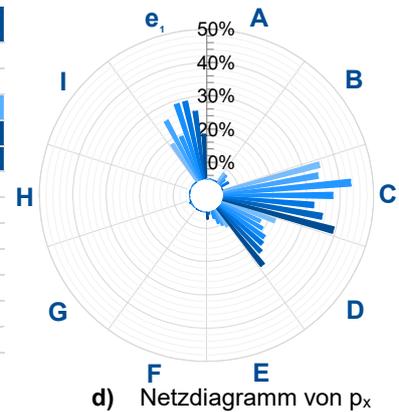
a) Tabellarische Aufschlüsselung von p_x b) Netzdiagramm von p_x

Bild 5-8 - Varianzanalyse verschiedener Bauteilorientierungen auf die Zielgröße E:

Die Auswertung der Zugfestigkeit in Bild 5-9 bestätigt oben ausgeführte Ergebnisse. Unabhängig von der Orientierung in der Baukammer zeigt die Wahl der Schichtstärke den größten Einfluss auf die Zugfestigkeit. Weiter beeinflusst der Energieeintrag durch die Leistung des Lasers maßgeblich die Zugfestigkeit. Dieser Einfluss nimmt mit abnehmendem Winkel zur Bauplattform zu. Gründe können in der Festigkeitsabnahme mit kleiner werdender Bauteilorientierung um bis zu 7,72 % gefunden werden, vergleiche Kapitel 6. Die Gewährleistung der Festigkeiten kann somit nur mit einem erhöhten Energieeintrag sichergestellt werden.

Faktor	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
A	3,45 %	0,84 %	0,18 %	-	0,60 %	3,99 %	4,24 %
B	2,88 %	4,19 %	7,53 %	4,57 %	7,14 %	8,34 %	8,44 %
C	39,27 %	35,10 %	32,16 %	37,75 %	43,29 %	33,86 %	34,97 %
D	26,79 %	23,41 %	22,01 %	21,31 %	19,35 %	17,74 %	21,78 %
E	7,15 %	5,59 %	5,00 %	7,25 %	9,08 %	10,17 %	11,21 %
F	-	-	0,60 %	-	1,13 %	0,50 %	-
G	1,88 %	5,33 %	3,67 %	0,24 %	0,19 %	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-
I	0,15 %	-	-	-	-	0,03 %	0,87 %
e1	18,43 %	25,54 %	28,85 %	28,88 %	19,22 %	25,37 %	18,49 %



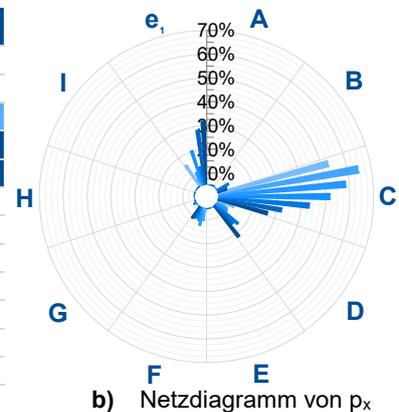
c) Tabellarische Aufschlüsselung von p_x

d) Netzdiagramm von p_x

Bild 5-9 - Varianzanalyse verschiedener Bauteilorientierungen auf die Zielgröße σ

Darüber hinaus zeigt sich, dass neben bereits genannten Faktorwirkungen auf die mechanischen Eigenschaften besonders der Spurbstand auf die Bruchdehnung einen signifikanten Einfluss hat, siehe Bild 5-10. Auch hier werden alle konturgebenden Belichtungsparameter größtenteils *gepooled*, bzw. zeigen durch ihre prozentuale Bedeutung keinen Einfluss auf die Bruchdehnung.

Faktor	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
A	-	-	-	-	-	0,38 %	1,56 %
B	8,77 %	9,15 %	10,60 %	2,76 %	3,96 %	4,34 %	5,49 %
C	26,34 %	31,81 %	43,18 %	51,55 %	58,39 %	64,50 %	52,72 %
D	21,45 %	15,83 %	17,30 %	10,39 %	9,79 %	8,36 %	12,21 %
E	0,66 %	0,77 %	1,54 %	2,98 %	3,92 %	3,06 %	5,18 %
F	10,75 %	10,33 %	9,78 %	10,68 %	12,34 %	10,23 %	6,06 %
G	0,38 %	3,98 %	4,56 %	0,84 %	0,66 %	-	-
H	-	-	-	-	-	-	-
I	-	-	0,27 %	0,60 %	-	0,98 %	1,01 %
e1	31,65 %	28,13 %	12,77 %	20,20 %	10,94 %	8,15 %	15,77 %



a) Tabellarische Aufschlüsselung von p_x

b) Netzdiagramm von p_x

Bild 5-10 - Varianzanalyse verschiedener Bauteilorientierungen auf die Zielgröße ϵ_M

5.3.2 Oberflächengüte

Die Erfassung des Qualitätsmerkmals Oberflächengüte erfolgt nach Kapitel 4.2.1 durch die stetigen, stets positiven Kenngrößen R_a und R_z . Zur Minimierung des Qualitätsverlustes, also der Maximierung des Signal-Rausch-Verhältnisses, wird das Minimierungsproblem nach Formel 4-13 eingesetzt. Der entwickelte Prüfkörper *PKG_02* bietet die Möglichkeit, die Flächenorientierung in einem Intervall von 15° messtechnisch zu erfassen, so dass im Zuge der Arbeit insgesamt 13 verschiedene Orientierungen untersucht werden. Analog zur Betrachtung der mechanischen Eigenschaften werden diese im Zuge der Wirkungsanalyse sowohl getrennt voneinander als auch zusammengefasst analysiert.

Die Betrachtung des Faktorwirkungsdiagramms aller zusammengefassten Orientierungen in Bild 5-11 zeigt eine hohe Standardabweichung entlang aller betrachteten Größen. Eindeutige allgemeingültige Aussagen können lediglich über die Prozessstemperaturen sowie über die Schichtstärke getroffen werden, wobei die Faktorwirkungen von Ra und Rz prinzipiell gleich bzw. identisch verlaufen. Im Gegensatz zur Gewährleistung der mechanischen Eigenschaften begünstigen hier niedrigere Prozesskammertemperaturen die Optimierung der Oberflächeneigenschaften, da ein größeres Temperaturfenster zu Akkumulation der Wärmeenergie und einer damit erhöhten Wärmeleitfähigkeit beiträgt. Die Folge ist ein unkontrolliertes Wachsen in den Randbereichen. Explizit schmelzen Pulverpartikel nahe der Bauteiloberfläche auf und verkleben mit dieser. Zurückführend auf die Spitzenhöhe c , vergleiche Formel 2-5, minimiert sich mit niedriger Schichtdicke D_s auch die Oberflächenrauheit. Die Betrachtung der weiteren Einstellfaktoren lässt auf eine hohe Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit auf die Orientierung schließen.

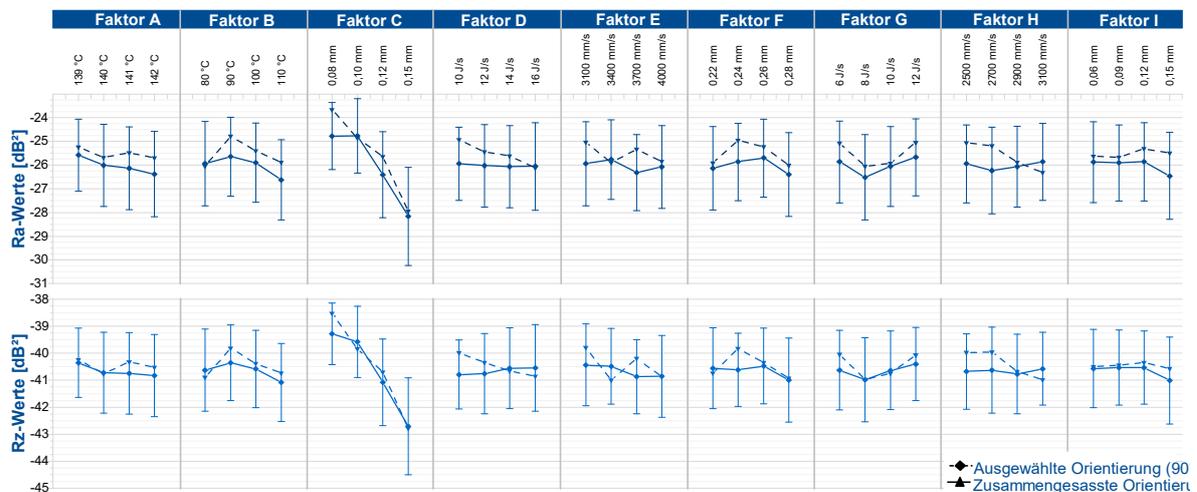
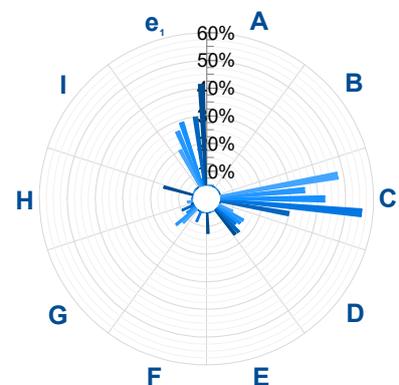


Bild 5-11 - Faktorwirkungsdiagramm für die Zielgröße Ra sowie Rz

Weiter wurden die Ergebnisse durch die Varianzanalyse verifiziert, siehe Bild 5-12. Die hier aufgeführten Auswertungen werden dabei in Abhängigkeit der Orientierung unterteilt in nach unten gerichteten Bauteiloberflächen ($0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$) und nach oben gerichteten Flächen ($90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$). Die Prozesskammer-, bzw. Entnahmekammertemperaturen zeigen bis auf die Ausnahme der Bauteilorientierung 30° respektive 0° keinen bzw. einen nicht signifikanten Einfluss auf die Zielgröße.

Faktor	0°	15°	30°	45°	60°	75°
A	-	3,81 %	4,26 %	-	-	-
B	5,67 %	3,68 %	-	-	2,83 %	-
C	2,79 %	29,89 %	55,78 %	42,43 %	35,33 %	47,77 %
D	16,28 %	16,57 %	13,72 %	14,85 %	15,21 %	10,28 %
E	12,41 %	-	0,61 %	-	0,79 %	-
F	-	1,85 %	8,83 %	-	-	-
G	5,67 %	9,51 %	6,30 %	8,52 %	14,26 %	11,85 %
H	15,81 %	4,26 %	1,86 %	5,26 %	5,14 %	6,85 %
I	-	0,62 %	1,32 %	-	-	3,32 %
e1	41,37 %	29,81 %	7,32 %	28,94 %	26,44 %	19,93 %

a) Tabellarische Aufschlüsselung von p_x



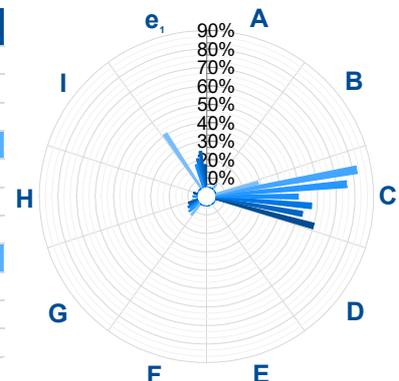
b) Netzdiagramm von p_x

Bild 5-12 - Varianzanalyse nach unten gerichteter Bauteiloberflächen auf die Zielgröße Rz

Wie erwartet, hat der Einstellparameter Schichtstärke einen höchst signifikanten Einfluss auf die Oberflächengüte. Ausgenommen ist hierbei die Orientierung 0°, da der Stufeneffekt innerhalb der Bauebene nicht von Relevanz ist. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Laserleistung sowohl von Füll- als auch von Konturbelichtung das Ergebnis der Oberflächengüte maßgeblich beeinflusst. Weitere Faktoren können im Zuge der Untersuchungen als nicht signifikant identifiziert werden. Bei der Betrachtung der Bauteilorientierungen 90° bis 180° fällt auf, dass die Laserleistung der Füllbelichtung keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächengüte hat bzw. größtenteils dem Fehleranteil zugeschrieben wird. Erklärungen können in der Tatsache gefunden werden, dass der Energieeintrag im Gegensatz zu den nach unten gerichteten Flächen nicht direkt in das Pulverbett, sondern auf eine bereits aufgeschmolzene Bauteilschicht geleitet wird und somit der Effekt der Pulveranhaftungen auf Grund von Nachschmelzen nicht zum Tragen kommt. Darüber hinaus decken sich die Tendenzen weitestgehend mit den nach unten orientierten Flächen.

Faktor	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
A	-	2,19 %	3,35 %	3,88 %	-	-	1,93 %
B	1,33 %	-	0,84 %	4,22 %	0,57 %	0,04 %	8,45 %
C	59,65 %	52,39 %	56,62 %	49,25 %	75,67 %	81,98 %	28,60 %
D	-	-	-	-	1,74 %	2,66 %	0,09 %
E	3,28 %	0,60 %	-	-	-	1,41 %	-
F	1,51 %	0,65 %	1,24 %	2,96 %	-	0,07 %	-
G	9,98 %	10,02 %	11,24 %	10,21 %	12,16 %	8,27 %	12,69 %
H	6,98 %	4,71 %	4,68 %	7,02 %	4,85 %	4,99 %	7,75 %
I	-	4,73 %	1,07 %	4,44 %	1,86 %	0,06 %	-
e1	17,27 %	24,71 %	20,96 %	18,02 %	3,15 %	0,52 %	40,49 %

a) Tabellarische Aufschlüsselung von p_x



b) Netzdiagramm von p_x

Bild 5-13 - Varianzanalyse nach oben gerichteter Bauteiloberflächen auf die Zielgröße Rz

5.3.3 Form- und Maßhaltigkeit

Für die Erfassung des Einflusses der Kontrollfaktoren auf die Form- und Maßhaltigkeit wird die Prüfkörpergeometrie *PKG_02* in Anlehnung an Kapitel 4.2.1 eingescannt, aufbereitet und ausgewertet. Betrachtet werden sollen der Übersichtlichkeit halber lediglich die Abweichungen des Bohrungsdurchmessers sowie der diagonalen Raumrichtung, mit dem Hinweis, dass sich die präsentierten Ergebnisse auf die weiteren Elemente übertragen lassen.

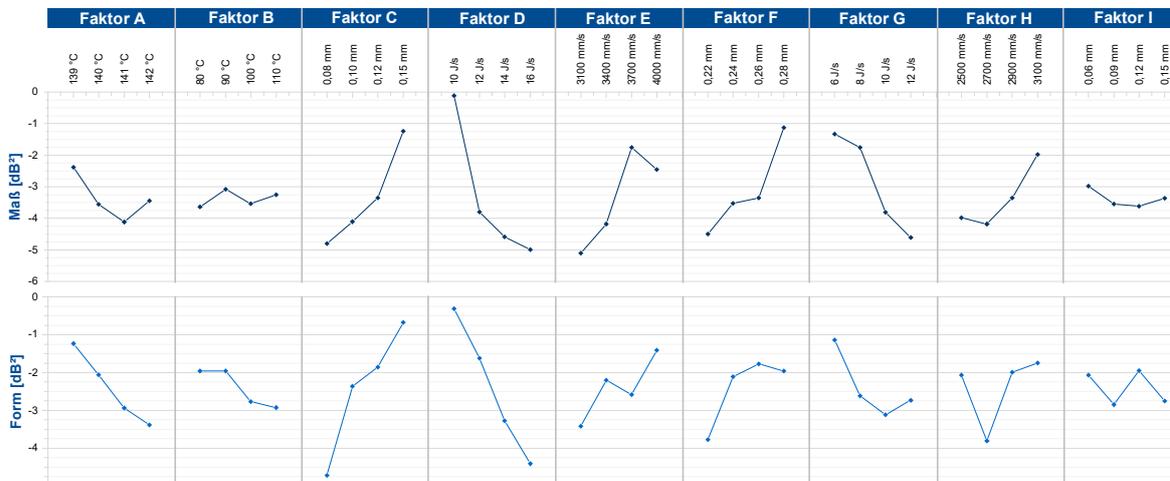


Bild 5-14 - Faktorwirkungsdiagramm für Form- und Maßhaltigkeit

Da eine minimale Abweichung aller dargestellten Zielgrößen in Bezug auf das Soll-Bezugssystem angestrebt wird, erfolgt die Wirkungsanalyse durch das Minimierungsproblem nach

Formel 4-13. Analog zur Analyse der Oberflächenbeschaffenheit begünstigen niedrigere Prozesstemperaturen die Gewährleistung der geometrischen Produktspezifikationen, wobei diese die Formtreue stärker beeinflusst, siehe Bild 5-14. Erkennbar ist dies an der größten Spannweite des Signal-Rauschverhältnisses. Die Erhöhung der Schichtstärke zeigt im Gegensatz zu den vorher betrachteten Zielgrößen eine Verbesserung sowohl von Form- als auch Maßhaltigkeit. Erklärt werden können diese Beobachtungen durch den verminderten Eintrag der Volumenenergiedichte, wodurch Sintererscheinungen an den Randbereichen des Bauteils unterbunden werden. Der Effekt der Stufenbildung ist in diesem Kontext weniger stark ausgebildet. Dieser Argumentation folgend ist es nachvollziehbar, dass die den Energieeintrag beeinflussenden Größen der Füllbelichtung eine große Spannweite aufweisen. Explizit sind durch eine hoch gewählte Laserleistung, niedrige Lasergeschwindigkeiten sowie kleine Spurbstände, also insgesamt eine hohe eingebrachte Energiemenge große Abweichungen bezüglich der Form- und Maßhaltigkeit zu erwarten, wie der Farbvergleich der Prüfkörpergeometrie aus Versuch 28 mit der CAD-Datei in Bild 5-15 a) zeigt. Die Kombination aus zu hoher Verarbeitungstemperatur und Energiedichte resultiert in großen Abweichungen besonders in den Eckbereichen der Geometrie. Gleiches kann für die Konturbelichtung festgehalten werden, bei der eine niedrige Laserleistung sowie eine hohe Lasergeschwindigkeit zu einer Erhöhung der Form- und Maßtreue führen. Die Strahlverschiebung hingegen zeigt keine eindeutige Tendenz.

Die in Bild 5-15 b) bzw. c) ausgewertete Varianzanalyse untermauert die Tendenzen bezüglich Schichtstärke und Laserleistung, wonach sich hier höchste Signifikanzen zeigen. Die Variation der beiden untersuchten Temperaturen beeinflusst primär die Maßhaltigkeit. Trotz einer großen Spannweite innerhalb der Faktorwirkungsanalyse stellen sich die Einstellfaktoren der Konturbelichtung im Falle des Bohrungsdurchmessers \varnothing_B als nicht signifikant heraus und werden für die Beurteilung des Maßes in diagonaler Richtung s_{Diag} dem Fehleranteil zugeschrieben.

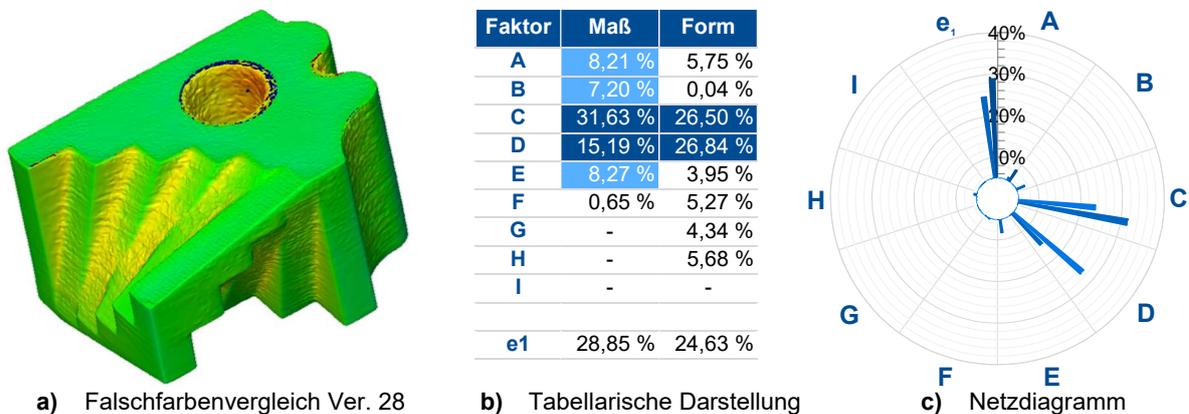


Bild 5-15 - Prozentualer Anteil der untersuchten Einflüsse auf die Zielgrößen Form und Maß

5.3.4 Fazit

Die Wechselwirkungen zwischen Einstellparametern und Zielgrößen können an dieser Stelle mathematisch nicht hergeleitet werden. Jedoch stellen die Wechselwirkungseffekte aus den Ergebnissen der statistischen Auswertung ein Maß für die Veränderung der Zielgrößen bei gleichzeitiger Variation definierter Faktoren dar und sind damit ein gutes Hilfsmittel zur Bewertung der Einstellgrößen. Auf Grundlage der durchgeführten Faktorwirkungs- und Varianzanalyse sind in Bild 5-16 empfohlene Faktorstufenbereiche zur Fertigung lasergesinterter Bauteile aus dem Werkstoff Polypropylen unter Einhaltung der jeweiligen Zielgrößen zusammengefasst. Es zeigt sich, dass in Abhängigkeit der betrachteten Zielgröße teilweise gegenläufige Faktoreinstellungen zu empfehlen sind.

Zur Gewährleistung der mechanischen Eigenschaften empfiehlt sich prinzipiell eine hohe Verarbeitungstemperatur von mindestens $T_{PK} = 141 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Kombination einer hohen Volumenenergiedichte, zusammengesetzt aus einer Schichtstärke $D_s \leq 0,1 \text{ mm}$, einer Laserleistung $P_{Fläche} \geq 13 \text{ W}$, einer Lasergeschwindigkeit $v_{Fläche} \geq 2700 \text{ mm/s}$ und einem Spurbabstand von $\Delta s = 0,25 \text{ mm}$, resultiert in höheren Bauteildichten und damit maximalen mechanischen Eigenschaften. Im Hinblick auf die geometrischen Produktspezifikationen sind in Abhängigkeit von der eingebrachten Energie jedoch Versinterungen zu beobachten, welche die Kantenschärfe und somit auch die Form- und Maßhaltigkeit nicht mehr gewährleisten können. Zusätzlich wirken sich die vermehrten Pulveranhaftungen in den Randbereichen direkt auf die Oberflächenbeschaffenheit aus. Weiter bestätigen die Varianzanalysen die Signifikanz von Prozesskammertemperatur und Flächenenergiedichte. Da eine Optimierung der einen Größe mit der Reduktion der weiteren Eigenschaften einhergeht, können eindeutige Einstellparameter für die Prozesskammertemperatur als auch für die Laserleistung der Füllbelichtung bzw. der Energiedichte als Gesamtes an dieser Stelle noch nicht getroffen werden. Weiter hat die Auswertung gezeigt, dass sich mit einer Entnahmekammertemperatur von $T_{EK} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ optimale Bauteileigenschaften einstellen.

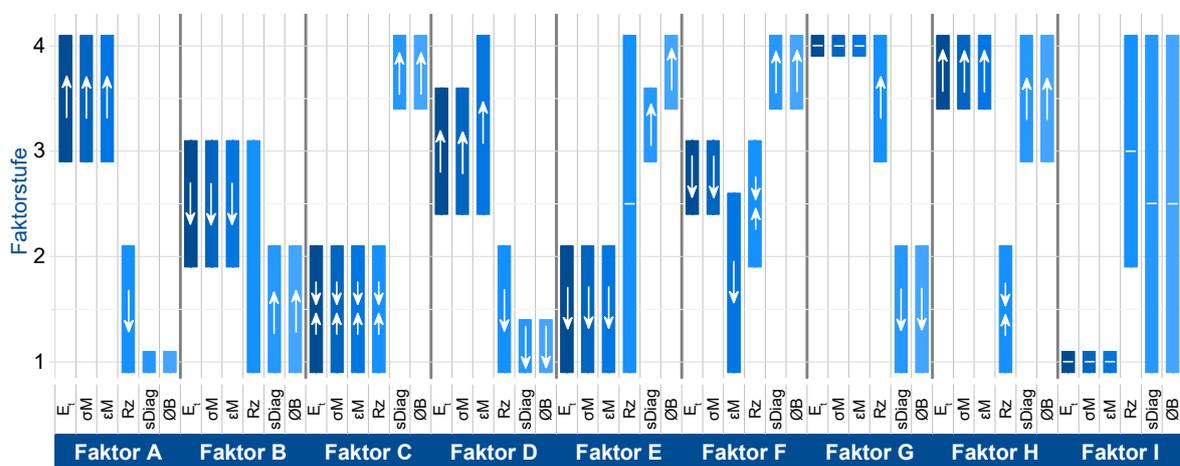


Bild 5-16 - Optimiertes Parameterfenster der betrachteten Zielgrößen

Prinzipiell empfehlen sich nach Auswertung der Wirkungsanalyse niedrige Energiedichten innerhalb der Konturbelichtung. Die Varianzanalyse jedoch belegt, dass diese weder auf die mechanischen noch auf die Form- und Maßhaltigkeit einen signifikanten Einfluss hat, in Abhängigkeit zur Bauteilorientierung größtenteils sogar dem Fehleranteil zugeschrieben wurde. Dem gegenübergestellt ist die Beschaffenheit der Oberfläche, welche maßgeblich durch die Streckenenergiedichte der Konturbelichtung geprägt wird. Hier zeigt sich jedoch, dass optimierte Parametereinstellungen in Abhängigkeit von der Bauteilorientierung stark variieren.

Da nach aktuellem Stand jedoch lediglich ein globaler Parametersatz definiert werden kann, stellt dieser zwangsweise einen Kompromiss zwischen den orientierten Flächen dar. Die Strahlverschiebung der Konturbelichtung zeigt bei keiner der betrachteten Zielgrößen einen signifikanten Einfluss. Da der durchgeführte L_{32} Versuchsplan mit der Auflösung III lediglich den Einfluss der Haupteffekte erfasst hat, haben sich Wechselwirkungen höherer Ordnung unkontrolliert mit anderen Effekten vermengt. Der hohe Fehleranteil innerhalb der durchgeführten Varianzanalysen lässt vermuten, dass die betrachteten Größen die Komplexität des Prozesses nur unzureichend abbilden und diese mindestens durch Faktor-Wechselwirkungseffekte mitbestimmt werden.

5.4 Modellgestützte Optimierung

Zum einen konnten durch vorangestellte Screening-Versuche nicht signifikante Einstellparameter identifiziert und eliminiert werden. Fragestellungen haben sich primär bezüglich der identifizierten signifikanten Haupteinflüsse Laserleistung bzw. der Energiedichte des Füllbereichs als Gesamtes sowie Prozesskammerheizung ergeben. Zum anderen hat sich gezeigt, dass ein eindimensionales Beschreibungsmodell die komplexen Prozesszusammenhänge nicht adäquat widerspiegelt. Um auch Faktorwechselwirkungen erfassen zu können, ist daher ein Versuchsplan höherer Auflösung zwingend erforderlich. Zur Minimierung des Versuchsaufwandes wird die Optimierung zweistufig ausgelegt.

In einem ersten Schritt werden zur quantitativen Beschreibung der Prozesszusammenhänge die oben genannten Einflussgrößen nach Kapitel 4.3.2 in Form eines vollfaktoriellen Versuchsplans 4⁴ weiter untersucht, siehe Tabelle 5-2. Durch die Wahl eines vollfaktoriellen Versuchsplans sind Haupt- und Wechselwirkungen unvermengt und überlagern sich somit nicht. Damit kann ein quadratisches Beschreibungsmodell ohne Schwierigkeiten versorgt werden. Anzumerken ist, dass Versuchskomponenten mit einer Flächenenergiedichte von $E_A > 2,5 \text{ J/cm}^2$ ausgeschlossen werden, ebenso wie die theoretische vierte Stufe der Prozesskammerheizung von $T_{PK} = 142,5 \text{ }^\circ\text{C}$, da eine Verarbeitung hier zum Prozessabbruch führen würde. Damit reduziert sich die totale Anzahl der Versuchsproben auf 168, fehlende Proben werden innerhalb der Software als unterdrückte Ausreißer definiert.

In Anlehnung an die gewonnenen Erkenntnisse sowie an bereits durchgeführte Untersuchungen, vergleiche Kapitel 2.7.2, wird eine Schichtstärke von $D_s = 0,1 \text{ mm}$ definiert, da hier ein Kompromiss aus maximalen mechanischen Eigenschaften, minimaler Oberflächenrauheit sowie Einhaltung der Form- und Maßhaltigkeit gegeben ist. Die weiteren Parameter zeigen keinen gemeinsamen signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen und werden dementsprechend im Zuge der folgenden Analysen konstant eingestellt ($T_{EK} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{Kontur} = 9 \text{ J/s}$, $V_{Kontur} = 2800 \text{ mm/s}$, $h = 0,12 \text{ mm}$).

Auf Basis der aus der Versuchsplanung ermittelten Daten werden Regressionsmodelle nach der in Kapitel 4.4.3 beschriebenen Vorgehensweise aufgebaut. Dabei wird neben den im Screening bekannten mechanischen Zielgrößen E_t , σ und ϵ_M zudem die Bauteildichte ρ für eine Bauteilorientierung von 90° mit aufgenommen. In Bezug auf die geometrischen Produktspezifikationen werden zunächst die oberflächenbeschaffenheitsbestimmenden Größen R_a und R_z analysiert.

Tabelle 5-2 - Versuchsplanung zur empirischen Modellbildung sowie modellgestützten Optimierung

Faktor	Einheit	1	2	3	4
A Temperatur	[$^\circ\text{C}$]	139,5	140,5	141,5	-
D Laserleistung	[W]	9	12	15	18
E Lasergeschwindigkeit	[mm/s]	2800	3400	4000	4600
F Spurbabstand	[mm]	0,18	0,21	0,24	0,26

Die Auswertung jeder Zielgröße erfolgt stets nach dem gleichen Muster. Zunächst werden erfasste Werte in insgesamt drei Diagrammen über den Größen Scangeschwindigkeit, Laserleistung sowie Spurbabstand aufgetragen und bewertet. Da sich aus diesen drei Prozessparametern die Flächenenergiedichte bildet, reicht eine zweidimensionale Darstellung nicht mehr aus, um einen direkten Bezug zu dieser zu erhalten. Daher wird zusätzlich auf die dreidimensionale ternäre Darstellung zurückgegriffen, hierbei ist auf die variierende Skalierung zu achten. Zur Bewertung der Zielgrößen ist die jeweilige Herstellerangabe [28] zu Grunde gelegt. Für die Evaluierung der Modellgüte werden auf Basis der Regressionsgleichung die vorhergesagten Werte den tatsächlich gemessenen Werten gegenübergestellt.

Darüber hinaus wird die ANOVA-Auswertung dargestellt und bewertet. Auf deren Grundlage wird zudem die Erhebung der signifikanten Parameter visuell erfasst. Die Ermittlung eines optimierten Parameterfensters dient als Grundlage, um in einer zweiten Stufe den Einfluss definierter Prozessparameter auf die geometrischen Produktspezifikationen zu evaluieren. Im Gegensatz zur Versuchsplanung nach Tabelle 5-2 werden die Faktoren hier lediglich einfaktoriell variiert.

5.4.1 Mechanische Eigenschaften

▪ Bauteildichte

Der Verlauf der Bauteildichte in Abhängigkeit von den untersuchten Prozessparametern ist in Bild 5-17 dargestellt. Dabei ist als kritische Größe die vom Hersteller garantierte Bauteildichte von $0,85 \text{ g/cm}^3$ zusätzlich aufgetragen [28]. Zunächst ergibt sich ein mit zunehmender Flächenenergiedichte nicht linearer Anstieg der Bauteildichte, wobei unter einer Flächenenergiedichte von $1,0 \text{ J/cm}^2$, im Detail bei Belichtungsparametern von $P_{\text{Fläche}} < 10 \text{ W}$, $v_{\text{Fläche}} > 4000 \text{ mm/s}$ sowie $\Delta s > 0,24 \text{ mm}$, nur unzureichende Bauteildichten von unter $0,85 \text{ g/cm}^3$ erreicht werden, so dass poröse Bauteile entstehen. Erst eine Erhöhung garantiert eine ausreichend hohe Bauteildichte. Ab einer Energiedichte von $E_A = 1,2 \text{ J/cm}^2$ wird ein Plateau erreicht, bei der es zunächst zu keiner signifikanten Änderung der Bauteildichte kommt. Hier sind maximale Bauteildichten von bis zu $\rho_{\text{max}} = 0,875 \text{ g/cm}^3$ zu beobachten, wobei diese ab $2,45 \text{ J/cm}^2$ wieder leicht absinkt. Die Feststoffdichte von Polypropylen von $\rho_{\text{PP}} = 0,95 \text{ g/cm}^3$ wird zu keinem Zeitpunkt erreicht. Mit Erhöhung der Prozesskammertemperatur verschiebt sich der Energiedichtebedarf zur Gewährleistung der Bauteildichte hin zu geringeren Werten. So ist der Energiebedarf bei einer Prozesskammertemperatur von $T_{\text{PK}} = 141,5 \text{ °C}$ im Vergleich zu $T_{\text{PK}} = 140,5 \text{ °C}$ um $10,70 \%$ geringer, um die geforderte Bauteildichte zu erreichen.

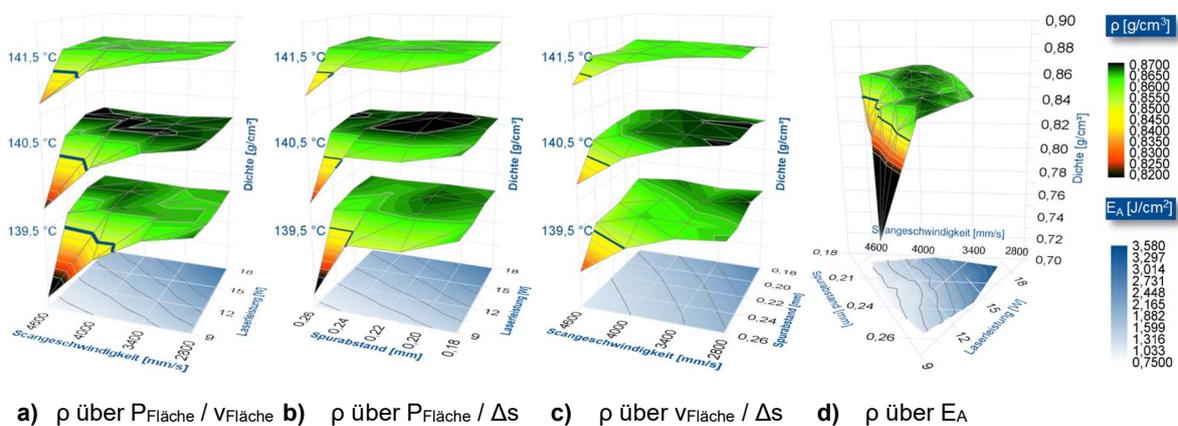


Bild 5-17 - Einfluss der Energiedichte auf die Bauteildichte (—: $\rho_{\text{krit}} = 0,85 \text{ g/cm}^3$)

Die Bewertung des aufgestellten Modells erfolgt nach den in Kapitel 4.5 aufgeführten Kontrollverfahren unter anderem durch den in Bild 5-18 a) dargestellten Vergleich der Messwerte mit den auf Basis der Regressionsgleichung vorhergesagten Werten. Auffällig ist die große Anhäufung von Messwerten im Bereich $\rho = 0,86 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, welche daraus resultieren, dass die erforderlichen Bauteildichten mit relativ geringen Energieeintrag erreicht werden und auf einem Niveau verbleiben, welches durch die Variation der betrachteten Einstellparameter nicht erhöht werden kann. Darüber hinaus zeigt sich, dass eine sehr gute Annäherung zwischen den gemessenen und den vorhergesagten Werten besteht. Das Modell zeigt demnach eine hohe Aussagekraft zur Vorhersage der Bauteildichte, welche durch einen Wert für das adjustierte Bestimmtheitsmaß von $R^2_{\text{adj}} = 0,958$ bestätigt wird. Das

vorhersagende Bestimmtheitsmaß liegt mit $R^2_{\text{pred}} = 0,944$ um lediglich 1,4 % von R^2_{adj} entfernt und belegt damit weiter die hohe Modellgüte.

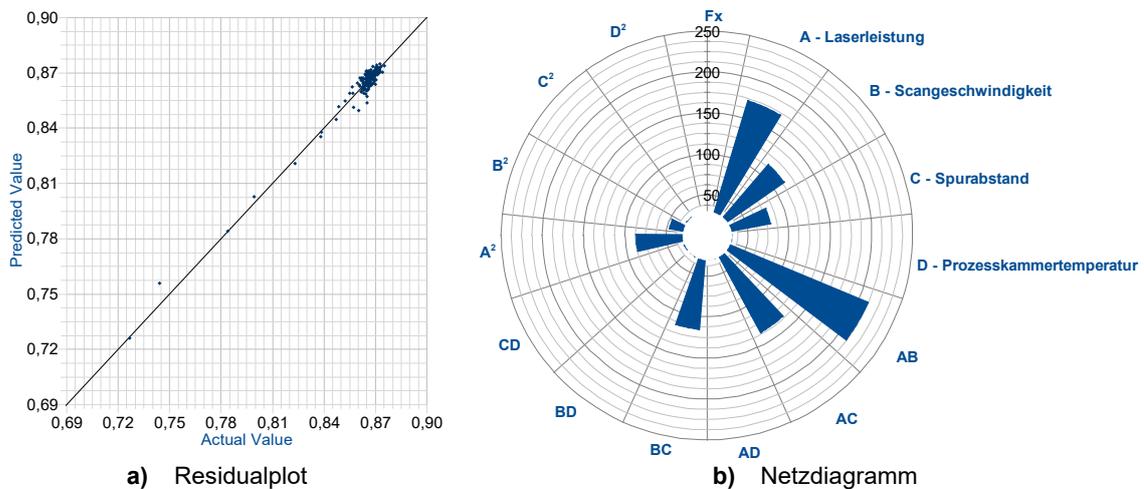


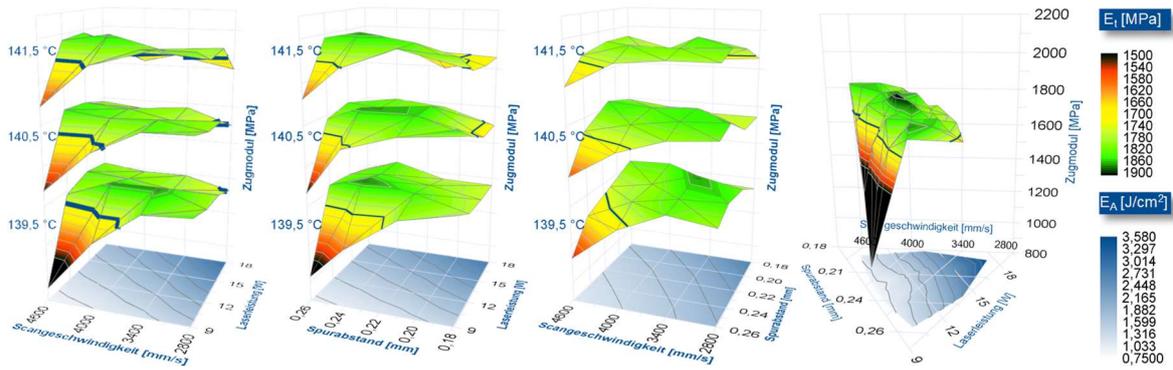
Bild 5-18 - Auswertung Bauteildichte

Weiterführend werden die innerhalb der Varianzanalyse ermittelten F-Werte in Bild 5-18 b) herangezogen, um die wichtigsten Einflüsse auf die Bauteildichte lasergesinterter Bauteile zu identifizieren. So zeigt sich, dass die Bauteildichte maßgeblich durch die Wechselwirkungen von Laserleistung und Scangeschwindigkeit beeinflusst wird. Dementsprechend wirken sich auch die linearen Einflüsse beider Größen auf die Bauteildichte aus. Der lineare Effekt des Spurabstandes hat zunächst eine geringere Bedeutung. Die Wechselwirkung mit der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit bestimmen das Ergebnis wiederum sehr stark. Die Prozesskammertemperatur zeigt im Vergleich den geringsten Einfluss. Auf Basis der ermittelten Datenbasis wird darüber hinaus eine Regressionsgleichung zweiter Ordnung aufgestellt, vergleiche Formel 5-4, welche die Komplexität des Laser-Sinterprozesses bestätigt.

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Reg}} = & 0,88 - 0,013 \cdot A + 0,016 \cdot B + 0,017 \cdot C - 7,644 \cdot 10^{-4} \cdot D \\ & + 0,026 \cdot AB + 0,019 \cdot AC - 0,006 \cdot AD - 0,016 \cdot BC \\ & + 5,125 \cdot 10^{-3} \cdot BD + 4,852 \cdot 10^{-3} \cdot CD - 0,016 \cdot A^2 \\ & - 0,012 \cdot B^2 - 8,284 \cdot 10^{-3} \cdot C^2 - 5,472 \cdot 10^{-3} \cdot D^2 \end{aligned} \quad \text{Formel 5-4}$$

▪ E-Modul

Analog zur Bauteildichte ist der E-Modul in Abhängigkeit von der Prozesskammertemperatur in Bild 5-19 über den Einstellparametern Laserleistung und Scangeschwindigkeit der Füllbelichtung sowie dem Spurabstand und schließlich über der gesamten Energiedichte aufgetragen. Das Verhalten zeigt einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf und bestätigt die Annahme, dass die Bauteildichte mit den Festigkeitswerten korreliert. So nimmt der E-Modul bei einer niedrigen Laserleistung von $P_{\text{Fläche}} = 9 \text{ W}$, einer hohen Scangeschwindigkeit von $v_{\text{Fläche}} = 4000 \text{ mm/s}$ sowie einem Spurabstand von $0,26 \text{ mm}$ ein Minimum, überschreitet bei einer Flächenenergiedichte von ca. $E_A = 1,07 \text{ J/cm}^2$ den kritischen Wert des Herstellers von $E_{t,\text{krit}} = 1750 \text{ N/mm}^2$ und erreicht sein Maximum bei $E_A = 1,47 \text{ J/cm}^2$ von $E_{t,\text{max}} = 1950 \text{ N/mm}^2$. Wird der Energieeintrag weiter erhöht, wachsen die Bauteile stark und bringen dementsprechend schlechtere Eigenschaften hervor. Durch den erhöhten Energieeintrag bei höheren Prozesstemperaturen verschieben sich die kritischen Grenzen hin zu niedrigeren Werten.



a) E_t über $P_{Fläche} / V_{Fläche}$ b) E_t über $P_{Fläche} / \Delta s$ c) E_t über $V_{Fläche} / \Delta s$ d) E_t über E_A

Bild 5-19 - Einfluss der Energiedichte auf den E-Modul (— : $E_{t_krit} = 1750 \text{ N/mm}^2$)

Der in Bild 5-20 a) dargestellte Vergleich zwischen Vorhersagewert und tatsächlich gemessenen Wert deutet auf eine hohe Modellgüte hin. So stellt sich ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von $R^2_{adj} = 0,964$ ein. Auch das vorhersagende Bestimmtheitsmaß R^2_{pred} liegt mit einem Wert von 0,94 ausreichend nah an R^2_{adj} . Anzumerken ist an dieser Stelle, dass zur Erzielung dieser guten Annäherung eine Reihe von Ausreißern identifiziert und von der Auswertung ausgeschlossen werden mussten.

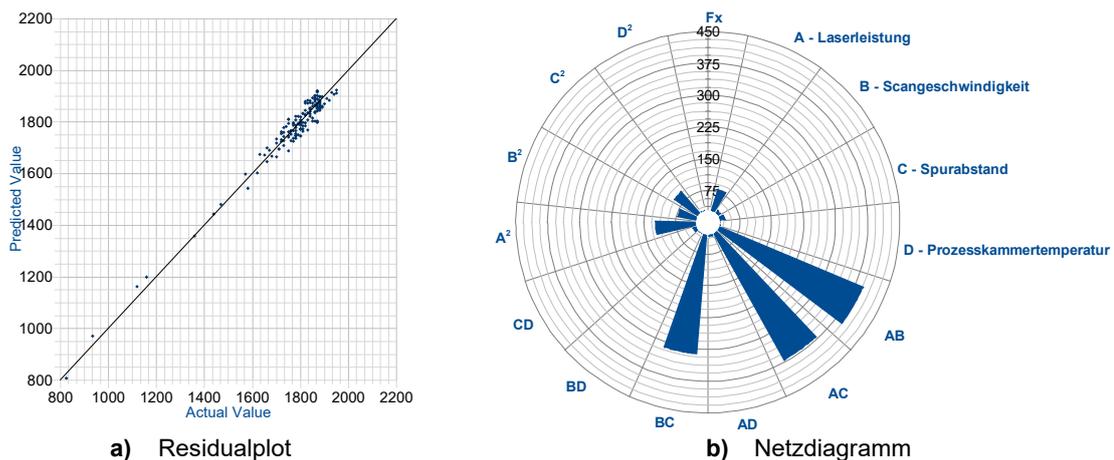


Bild 5-20 - Auswertung des E-Moduls

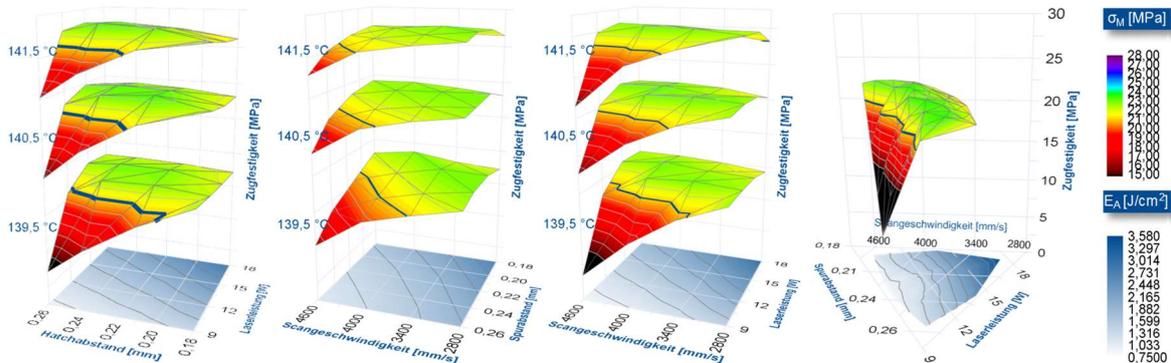
Darüber hinaus wurden wie eingangs erwähnt Versuchskomponenten mit einer Flächenenergiedichte von $E_A > 2,5 \text{ J/cm}^2$ genauso wie die theoretische vierte Stufe der Prozesskammerheizung von $T_{PK} = 142,5 \text{ °C}$ ausgeschlossen. In Kombination mit dem Ausschließen potentieller Ausreißer kann die Auswertung der F-Werte im Zuge der Varianzanalyse in Bild 5-20 b) interpretiert werden. So wird der E-Modul maßgeblich von den Wechselwirkungen zwischen Laserleistung und Scangeschwindigkeit bzw. Laserleistung und Spurabstand sowie den quadratischen Wechselwirkungen geprägt. Die linearen Einflussfaktoren zeigen innerhalb der Modellbildung zwar einen signifikanten Einfluss, sind in ihrer Gewichtung zu den Wechselwirkungseffekten jedoch eher unerheblich. Als Resultat wird das in Formel 5-5 dargestellte Regressionsmodell zur Vorhersage des E-Moduls in Abhängigkeit von den Prozessparameter aufgestellt.

$$\begin{aligned}
 E_{t_Reg} = & -3,955 + 1256,74 \cdot A - 5,553 \cdot B - 1,527 \cdot 10^{-5} \cdot C \\
 & + 5934,523 \cdot D + 0,051 \cdot AB + 1144,242 \cdot AC - 10,973 \\
 & \cdot AD - 5,309 \cdot BC + 0,050 \cdot BD + 1353,917 \cdot CD \\
 & - 6,502 \cdot A^2 - 1,233 \cdot 10^{-4} \cdot B^2 - 72696,29 \cdot C^2 \\
 & - 22,359 \cdot D^2
 \end{aligned}$$

Formel 5-5

▪ Zugfestigkeit

Weiter wird die Zugfestigkeit betrachtet, deren Kennwert vom Hersteller mit $\sigma_{\text{krit}} = 23 \text{ N/mm}^2$ angegeben wird [28]. Die Bauteilfertigung mit dem im Versuchsplan am niedrigsten einstellbaren Energiedichte von $0,75 \text{ J/cm}^2$ resultiert in minimalen Zugfestigkeiten, siehe Bild 5-21.



a) σ über $P_{\text{Fläche}} / V_{\text{Fläche}}$ b) σ über $P_{\text{Fläche}} / \Delta s$ c) σ über $V_{\text{Fläche}} / \Delta s$ d) σ über E_A

Bild 5-21 - Einfluss der Energiedichte auf die Zugfestigkeit (—: $\sigma_{\text{krit}} = 23 \text{ N/mm}^2$)

Die gleichzeitige Erhöhung der Laserleistung sowie die Verringerung der Scangeschwindigkeit und des Spurbabstandes führen zunächst zu einem annähernd linearen Anstieg der Zugfestigkeit bis zum Erreichen der vom Hersteller garantierten Zugfestigkeit. Dies entspricht einer Flächenenergiedichte von $1,15 \text{ J/cm}^2$. Eine weitere Erhöhung der Energiedichte lässt die Zielgröße sich degressiv einem maximalen Wert von $24,7 \text{ MPa}$ annähern, bevor die Werte ab einer Energiedichte von $1,72 \text{ J/cm}^2$ wieder absinken.

Die in Formel 5-6 aufgestellte Regressionsgleichung zeichnet sich durch eine hohe Güte zur Vorhersage der Zugfestigkeit aus, primär erkennbar an dem adjustierten Bestimmtheitsmaß von $R^2_{\text{adj}} = 0,977$. Auch das vorhersagende Bestimmtheitsmaß $R^2_{\text{pred}} = 0,958$ ist ausreichend nahe an R^2_{adj} platziert und garantiert somit eine genaue Modellbildung.

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Reg}} = & -8327,451 + 24,207 \cdot A - 0,065 \cdot B - 1808,299 \cdot C + 121,130 \\ & \cdot D + 1,027 \cdot AB + 20,608 \cdot AC - 0,199 \cdot AD - 0,070 \\ & \cdot BC + 5,804 \cdot BD + 15,526 \cdot CD - 0,173 \cdot A^2 - 1,964 \\ & \cdot B^2 - 866,356 \cdot C^2 - 0,44 \cdot D^2 \end{aligned} \quad \text{Formel 5-6}$$

Bestätigt wird die Aussage über die Qualität der Regressionsgleichung durch den in Bild 5-22 a) dargestellten Residualplot. Die Vorhersagewerte liegen über den gesamten Wertebereich hinweg nahe den Versuchsdaten, wobei ähnlich zu der Bauteildichte oder dem E-Modul auch hier eine Anhäufung hin zu höheren Festigkeitswerten zu beobachten ist.

Die in Bild 5-22 b) aufgezeigten Einflüsse auf die Zugfestigkeit spiegeln die Erkenntnisse der Screening-Versuche wieder, da der lineare Faktor Laserleistung auch hier den maßgeblichen Einfluss innehat, gefolgt von der Scangeschwindigkeit. Analog zu den bereits erfassten mechanischen Kenngrößen weisen auch die Wechselwirkungen zwischen $P_{\text{Fläche}}$ und $V_{\text{Fläche}}$, sowie $P_{\text{Fläche}}$ und Δs einen Haupteinfluss auf. Den geringsten Einfluss zeigt die Prozesskammertemperatur - sowohl der lineare Einfluss als auch alle in Kombination mit T_{PK} auftretenden Wechselwirkungen.

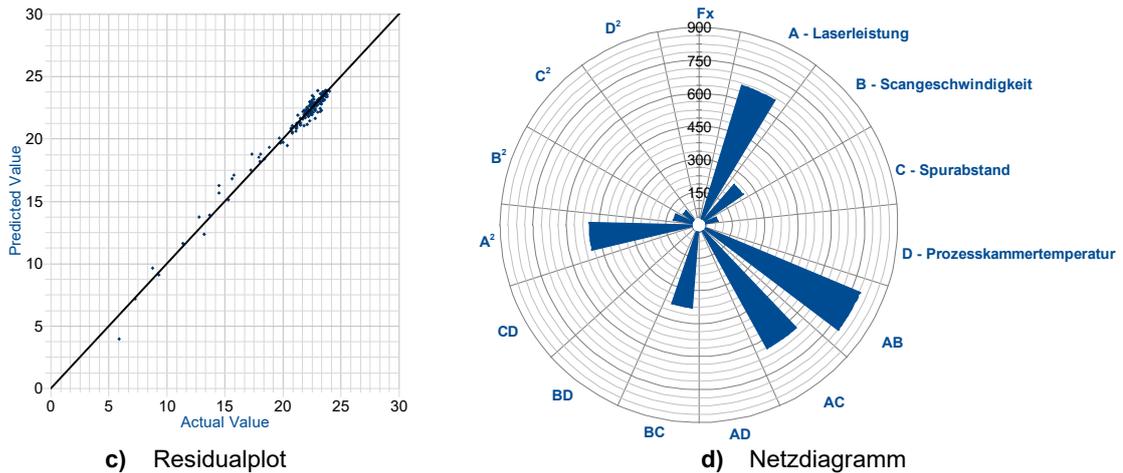


Bild 5-22 - Auswertung Zugfestigkeit

▪ **Bruchdehnung**

Als letzte mechanische Kenngröße wird die Bruchdehnung betrachtet. Die in Bild 5-23 dargestellten Verläufe zeigen, dass im direkten Vergleich zu den vorherigen Kennwerten ein relativ gesehen hoher Energieeintrag zur Gewährleistung der aus dem Datenblatt des Herstellers kritischen Bruchdehnung von $\epsilon_{M_krit} = 5,5 \%$ notwendig ist. Auch streuen diese mit minimalen Bruchdehnungen von $\epsilon_{M_min} = 3,40 \%$ und maximalen Bruchdehnungen von $\epsilon_{M_max} = 6,07 \%$ wesentlich mehr; ein Zeichen dafür, dass es sich hier um eine den Prozessparametern gegenüber sehr sensitive Kenngröße handelt. Eine ausreichende Bruchdehnung von $5,50 \%$ wird ab einer Flächenenergiedichte von $E_A = 1,47 \text{ J/cm}^2$ erreicht. Unter dem Einsatz einer Laserleistung von $P_{Fläche} = 9 \text{ J/s}$ sind somit eine minimale Scangeschwindigkeit von $v_{Fläche} = 2800 \text{ mm/s}$ sowie ein minimaler Spurabstand von $\Delta s = 0,18 \text{ mm}$ einzustellen. Mit Erhöhung der Laserleistung können die jeweils anderen Einstellgrößen nach bekannter Energiedichteformel, vergleiche Formel 2-10, gleichmäßig erhöht werden. Darüber hinaus beeinflusst die Prozesskammertemperatur das Ergebnis unwesentlich.

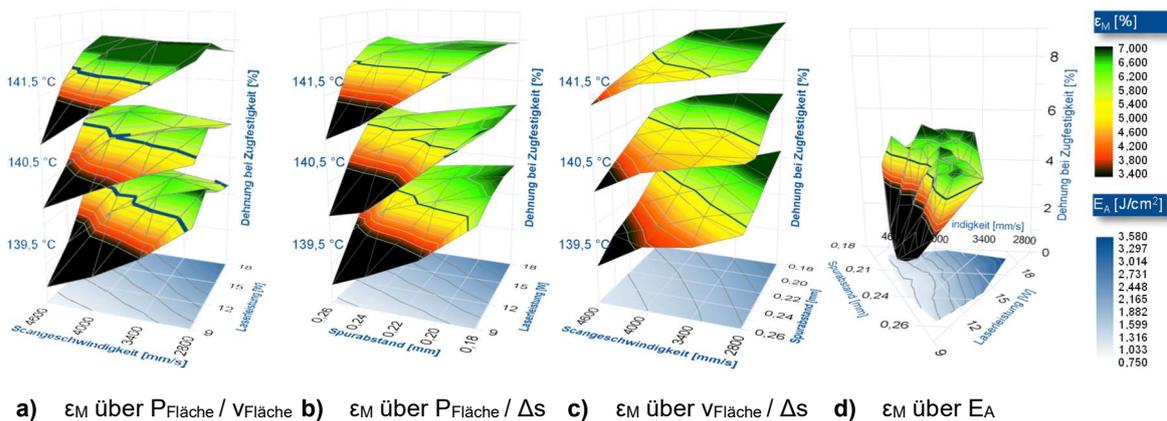


Bild 5-23 - Einfluss der Energiedichte auf die Bruchdehnung (—: $\epsilon_{M_krit} = 5,5 \%$)

Zur quantitativen Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Einstellparametern und der Bruchdehnung wird auch hier auf Basis der Versuchsdaten ein Regressionsmodell zweiter Ordnung aufgestellt, siehe Formel 5-7.

$$\begin{aligned} \epsilon_{M_Reg} = & 1786,621 + 7,225 \cdot A - 0,022 \cdot B - 798,683 \cdot C - 24,395 \cdot D \\ & + 2,710 \cdot 10^{-4} \cdot AB + 5,530 \cdot AC - 0,058 \cdot AD - 0,012 \\ & \cdot BC + 1,703 \cdot 10^{-4} \cdot BD + 5,603 \cdot CD - 0,045 \cdot A^2 \\ & - 4,620 \cdot 10^{-7} \cdot B^2 - 79,583 \cdot C^2 \end{aligned}$$

Formel 5-7

Wie in Bild 5-24 a) dargestellt, liegen die Vorhersagewerte breiter gestreut. Besonders im mittleren Bereich ist mit höheren Abweichungen der Vorhersagewerte zu rechnen. Dementsprechend ist die Modellgüte im direkten Vergleich mit den vorher erfassten Kennwerten geringer. Jedoch bietet das Modell mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von $R^2_{\text{adj}} = 0,934$ und einem vorhersagenden Bestimmtheitsmaß von $R^2_{\text{pred}} = 0,915$ immer noch eine sehr gute Vorhersagequalität.

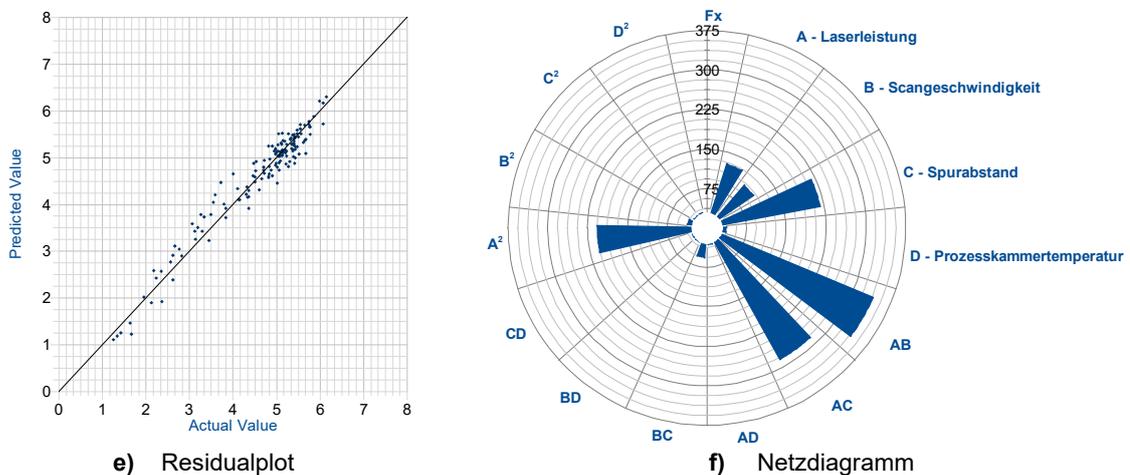


Bild 5-24 - Auswertung der Bruchdehnung

Die Auswertung der Varianzanalyse weist starke Parallelen zu den bereits erfassten mechanischen Kennwerten auf. Deutlich sind lineare Abhängigkeiten der Bruchdehnung von der Laserleistung, der Scangeschwindigkeit sowie dem Spurbstand zu identifizieren, wobei letzterer am ausgeprägtesten ist. Darüber hinaus sind Wechselwirkungen aller drei Faktoren zu beobachten. Besonders die quadratische Wechselwirkung der Laserleistung fällt ins Gewicht. Stellte sich die Prozesskammertemperatur innerhalb der Versuche in Kapitel 5.3.1 noch als signifikant heraus, zeigt diese innerhalb der Optimierungsversuche den geringsten Einfluss, da dieser von den drei anderen Einflüssen überschattet wird.

5.4.2 Einfluss auf Oberflächengüte

Die Auswertung der Oberflächengüte erfolgt analog zur Auswertung der mechanischen Eigenschaften. Der Übersichtlichkeit halber wird auf die Auswertung des arithmetischen Mittelrauhheitswertes R_a nicht weiter eingegangen, da sich Erkenntnisse mit denen der gemittelten Rautiefe R_z decken. Weiter sei erwähnt, dass im Zuge der Optimierung der Oberflächengüte zunächst die Bauteilorientierung $\alpha = 90^\circ$ betrachtet wird und im anschließenden Kapitel 7 auf weitere Orientierungen überführt wird. Im Gegensatz zu den mechanischen Eigenschaften finden sich für die Bewertung der Oberflächengüte keine Herstellerangaben. In Anlehnung an vergangene Studien, vergleiche Kapitel 2.7.2, wird an dieser Stelle daher ein kritischer Referenzwert von $R_{z90^\circ_krit} = 100 \mu\text{m}$ eingeführt.

Die in Abhängigkeit von den untersuchten Einstellparameter resultierende Oberflächengüte ist in Bild 5-25 dargestellt. Es zeigt sich, dass nur für Laserleistungen $P_{\text{Fläche}} < 16 \text{ J/s}$ und einen Spurbstand $\Delta s > 0,20 \text{ mm}$ eine Oberflächengüte von $R_z < 100 \mu\text{m}$ zu erwarten ist. Darüber hinaus liefern eine zu hohe aber auch eine zu niedrige Scangeschwindigkeit eine schlechte Oberflächengüte. Durch die Erhöhung der Prozesskammertemperatur über $140,5 \text{ }^\circ\text{C}$ kann die Oberflächengüte unabhängig von der Wahl der übrigen Einstellparameter nicht gewährleistet werden. Damit definiert sich die minimale Flächenenergiedichte zu $E_{A_min} = 0,93 \text{ J/cm}^2$ und die maximale Flächenenergiedichte zu $E_{A_max} = 1,61 \text{ J/cm}^2$. Optimale Werte der Zielgröße stellen sich durch ein Zubewegen beider Grenzen ein. Explizit

wird bei einer Flächenenergiedichte von $E_{A_opt} = 1,34 \text{ J/cm}^2$ ($P_{Fläche} = 9 \text{ W}$, $v_{Fläche} = 2800 \text{ mm/s}$ und $\Delta s = 0,24 \text{ mm}$) eine minimale gemittelte Rautiefe von $Rz_{min} = 84,87 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ erreicht.

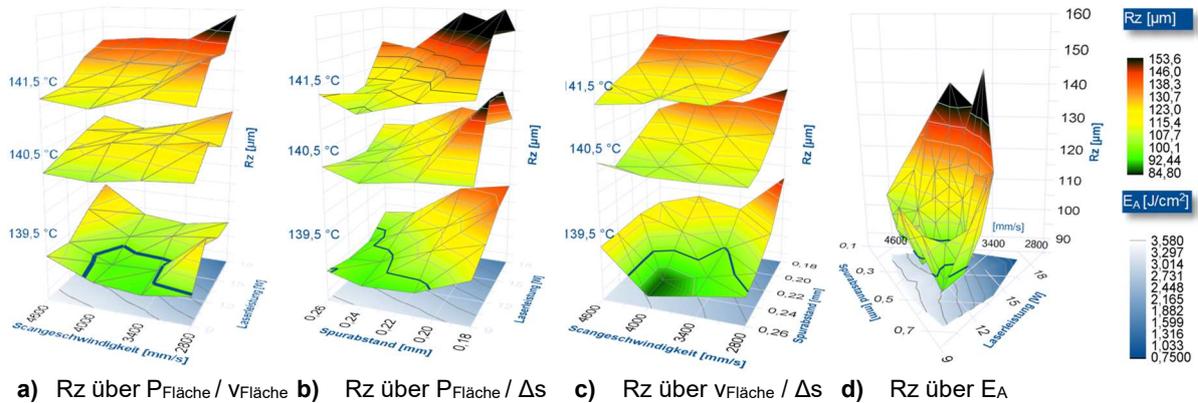


Bild 5-25 - Einfluss der Energiedichte auf die Oberflächengüte (—: $Rz_{krit} = 100 \mu\text{m}$)

Bild 5-26 a) zeigt die Gegenüberstellung der aus der Regressionsgleichung resultierenden Vorhersagewerte mit den tatsächlich gemessenen Werten. Es zeigen sich im direkten Vergleich zu der Betrachtung der mechanischen Kennwerte größere Abweichungen innerhalb der Darstellung des Residualplots, ein Indiz für eine niedrige Modellgüte. Die Bewertung der Regressionsgleichungen auf Basis des multiplen Bestimmtheitsmaßes bestätigt die Annahme. Durch die in Kapitel 4.5 beschriebene Methodik wurden jedoch Ausreißer identifiziert und aus der Auswertung ausgeschlossen, wodurch sich ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von $R^2_{adj} = 0,850$ ergibt - ein Wert, welcher immer noch für eine sehr hohe Modellgüte spricht. Auch das vorhersagende Bestimmtheitsmaß von $R^2_{pred} = 0,8325$ liegt ausreichend nahe an ersterem Wert.

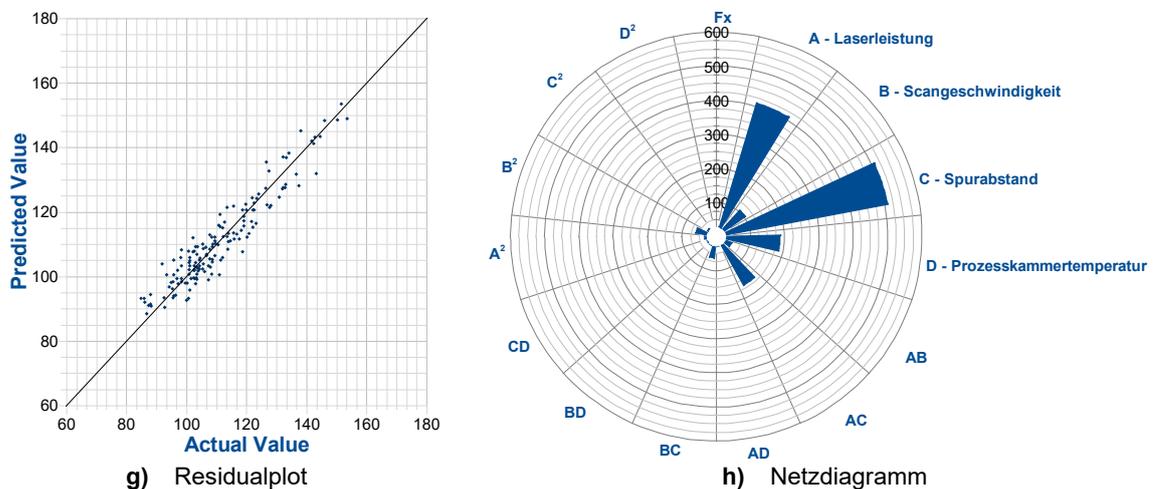


Bild 5-26 - Auswertung Oberflächenrauheit Rz

Die Identifizierung der Haupteinflüsse auf Basis der Varianzanalyse zeigt, dass primär der Spurabstand und die Laserleistung der Füllbelichtung sowie die Wechselwirkung beider Größen die Zielgröße beeinflussen. Eine Beobachtung, welche sich mit den Ergebnissen durchgeführter Untersuchungen mit PA 12 deckt [162], [164]. Weitere Wechselwirkungen sind vernachlässigbar. Darüber hinaus bestätigt sich in Folge der Varianzanalyse der in Bild 5-25 aufgezeigte hohe Einfluss der Prozesskammertemperatur, nach dem die Oberflächengüte von $Rz = 100 \mu\text{m}$ ab einer Prozesskammertemperatur von $140,5 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht mehr zu gewährleisten ist.

$$\begin{aligned}
 R_{z,Reg} = & -3334,989 - 106,677 \cdot A + 0,467 \cdot B + 7663,696 \cdot C \\
 & + 26,850 \cdot D - 1,807 \cdot 10^{-3} \cdot AB - 81,347 \cdot AC \\
 & + 0,899 \cdot AD + 0,214 \cdot BC - 4,114 \cdot 10^{-3} \cdot BD \\
 & - 68,889 \cdot CD + 0,328 \cdot A^2 + 1,064 \cdot B^2 + 1,064 \cdot 10^{-5} \\
 & \cdot C^2 + 4285,394 \cdot D^2
 \end{aligned}$$

Formel 5-8

Die vorangestellten Untersuchungen in Kapitel 5.3.2 haben gezeigt, dass neben der Energiedichte der Füllbelichtung auch die Konturbelichtung einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächengüte hat. Die Betrachtung des Bestimmtheitsmaßes der aufgestellten Regressionsgleichung deutet auf einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der „nicht erklärten“ Varianz hin. Im Vergleich zur Modellbildung der mechanischen Kennwerte höhere Fehleranteil deutet dieser auf weitere signifikante Einflussfaktoren hin, welche nicht in die Modellbildung einbezogen wurden.

Mit den gewonnen Erkenntnissen erfolgen daher weitere Analysen der Konturbelichtung. Untersucht werden die Laserleistung P_{Kontur} in den Grenzen $5 \text{ J/s} - 25 \text{ J/s}$ sowie die Laser geschwindigkeit v_{Kontur} in den Grenzen $1000 \text{ mm/s} - 5000 \text{ mm/s}$ in Form eines vollfaktoriellen fünfstufigen Versuchsplans. Damit ergeben sich in Summe 25 Versuche, deren Auswertung in Bild 5-27 dargestellt ist. Darüber hinaus werden die Strukturen der lasergesinterten Bauteiloberflächen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie näher untersucht.

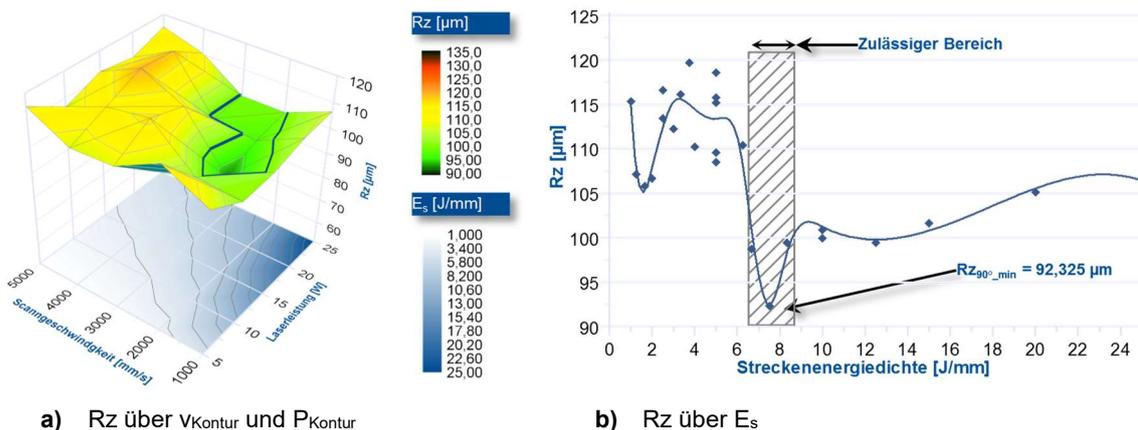
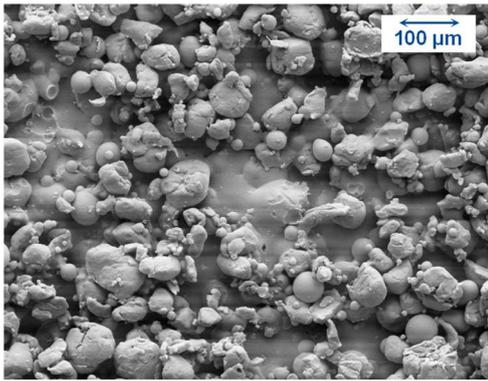
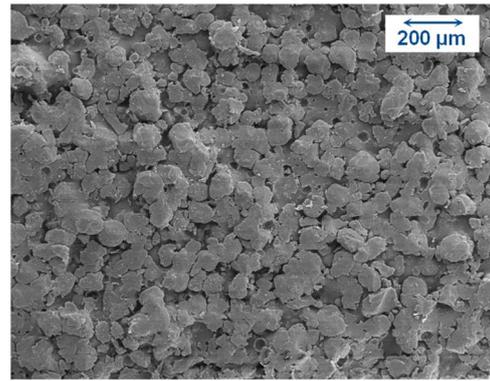


Bild 5-27 - Variation der Streckenenergiedichte der Konturbelichtung

Es zeigt sich der hohe Einfluss der konturbelichtenden Einstellfaktoren auf die Oberflächengüte. So streut der Oberflächenkennwert R_z innerhalb der Grenzen $R_{z,\text{max}} = 119,63 \mu\text{m}$ und $R_{z,\text{min}} = 92,33 \mu\text{m}$. Bis zu einer Streckenenergiedichte $E_s = 6 \text{ J/cm}$ befindet sich die gemittelte Rautiefe auf einem Plateau von etwa $R_{z\emptyset} = 115,72 \mu\text{m}$. Die Betrachtung der REM-Aufnahme in Bild 5-28 a) lässt eine Anhäufung nicht verschmolzener Pulverpartikel auf der Bauteiloberfläche erkennen, welche für die hohen gemessenen Rauheitskennwerte verantwortlich sind. Ein Heraufsetzen der Streckenenergiedichte resultiert gleichzeitig in einer Verringerung der Oberflächenrauheit um 25,33 %. Es ergibt sich ein homogeneres Oberflächenbild, vergleiche Bild 5-28 b). Durch den erhöhten Energieeintrag der Konturbelichtung wird die Laserspür größer, angrenzende Partikel schmelzen auf Grund des höheren Temperaturniveaus der Schmelze leichter vollständig auf. Mit weiterer Erhöhung der Streckenenergiedichte erhöht sich jedoch auch die Zahl der lediglich angeschmolzenen Pulverpartikel mit dem Ergebnis, dass ab einer Streckenenergiedichte von $E_s = 9 \text{ J/cm}$ die Oberflächengüte sinkt und sich einem Rauheitswert von $R_z = 106,21 \mu\text{m}$ annähert.



a) $E_s = 3,75 \text{ J/cm}$ ($R_z = 119,63 \text{ μm}$)



b) $E_s = 7,50 \text{ J/cm}$ ($R_z = 92,33 \text{ μm}$)

Bild 5-28 - Makroskopische Aufnahmen von Bauteiloberflächen lasergesinterter Bauteile

5.4.3 Einfluss auf Form- und Maßhaltigkeit

Neben der Betrachtung der mechanischen Eigenschaften und Oberflächengüte lasergesinterter Bauteile werden an dieser Stelle zudem die Form- und Maßhaltigkeit als weiterer Aspekt der geometrischen Produktspezifikationen analysiert. Zum einen sollen hier generelle Aussagen über den Einfluss der herangezogenen Prozessparameter getroffen werden, zum anderen sollen minimal fertigbare Bauteilstrukturen ermittelt und aufgezeigt werden. Analog zur bisherigen Vorgehensweise werden explizit alle der Flächenenergiedichte der Füllbelichtung sowie der Streckenenergiedichte der Konturbelichtung zugehörigen Prozessparameter in fünf Stufen in den zuvor definierten Grenzen, vergleiche Tabelle 5-2, variiert.

Im Vorfeld erfolgt eine Parameterskalierung. Da diese jedoch lediglich für den zentralen Einstellparameter erfolgt, sind die folgenden Ergebnisse rein qualitativer Natur. Die Versuche werden in Anlehnung an Kapitel 4.2.1 mit der Prüfkörpergeometrie *PKG_01* durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden alle in Bild 4-3 dargestellten Formelemente analysiert. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird der Übersichtlichkeit halber allerdings zunächst auf die Formelemente Bohrungen, Spaltmaße, Zylinder, Wandstärken sowie Innen- und Außendurchmesser eingegangen. Weiter sind durch den Probenkörper alle Formelemente in variierenden Größen von 0,2 mm bis 2,0 mm dargestellt und gefertigt worden. Der Einfluss der Prozessparameter bezieht sich hier zunächst auf die Größe 2,0 mm. Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse auf die verbleibenden Größen ausgeweitet.

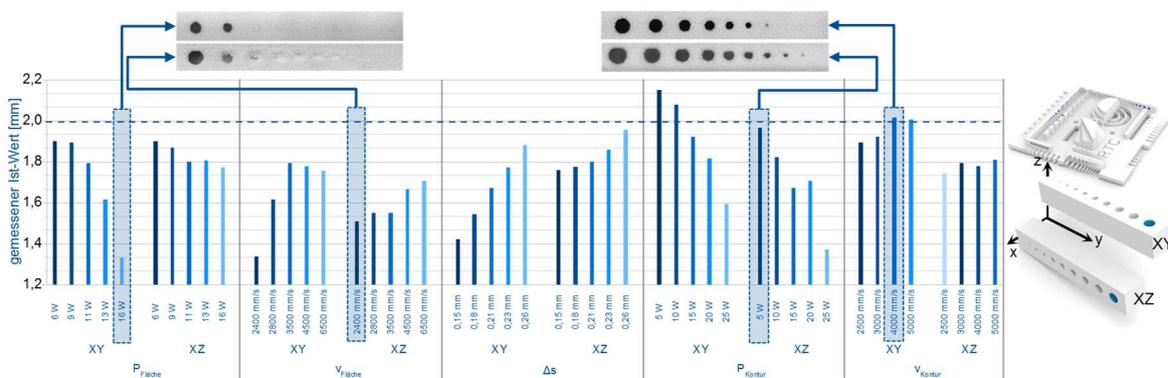


Bild 5-29 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf Bohrungen

Bild 5-29 zeigt die Ergebnisse der Variationen der Prozessparameter für das Größenmaßelement Bohrung mit einem Durchmesser 2,0 mm. Dargestellt ist der erfasste Durchmesser der jeweiligen Bohrungsdurchmesser. Deutlich ist über die Flächenenergiedichte sowohl von Füll- als auch von Konturbelichtung ein Anstieg der erfassten Abweichungen erkennbar.

So weicht der Bohrungsdurchmesser bei einer Energiedichte von $E_{\text{Fläche}} = 2,18 \text{ J/cm}^2$ um bis zu 33, 56 % vom Nenndurchmesser von 2,0 mm ab. Weiter werden hier lediglich Bohrungsdurchmesser $> 1,6 \text{ mm}$ dargestellt, kleinere Bohrungen sind vollständig versintert. Eine Energiedichte von $E_{\text{Fläche}} < 1,3 \text{ J/cm}^2$ bzw. $E_{\text{Kontur}} = 5 \text{ J/cm} \pm 2 \text{ J/cm}$ gewährleistet maßhaltige Bohrungsdurchmesser.

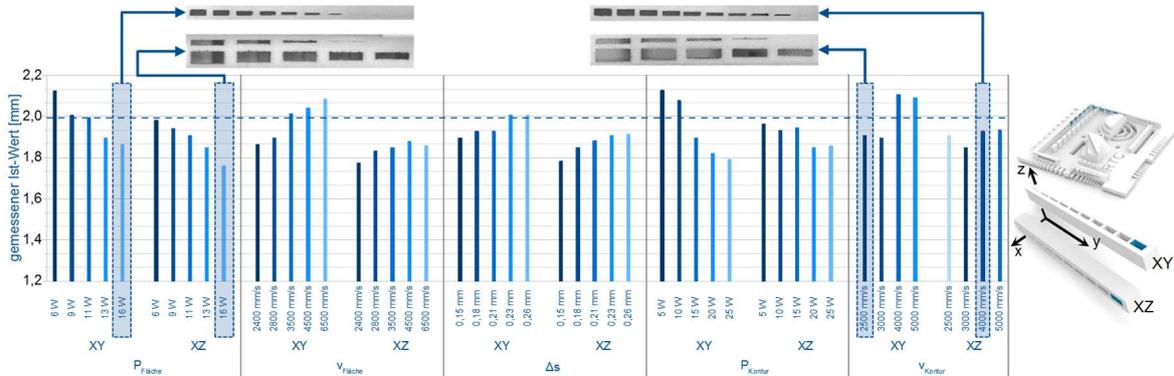


Bild 5-30 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf darstellbare Spaltmaße

Ein grundsätzlich ähnliches Verhalten zeigt sich bei der Auswertung der darstellbaren Spaltmaße in Bild 5-30. Dargestellt ist hier die variierende Höhe der Spaltmaße. Höchste Abweichungen von bis zu 11,96 % sind durch Erhöhung des Energieeintrages zu beobachten. Innerhalb der Füllbelichtungsparameter beeinflusst die Variation sowohl von Laserleistung $P_{\text{Fläche}}$, -geschwindigkeit $v_{\text{Fläche}}$, als auch Spurabstand Δs die Formhaltigkeit gleichermaßen. Innerhalb der Belichtung der Kontur ist primär die Laserleistung P_{Kontur} zu nennen.

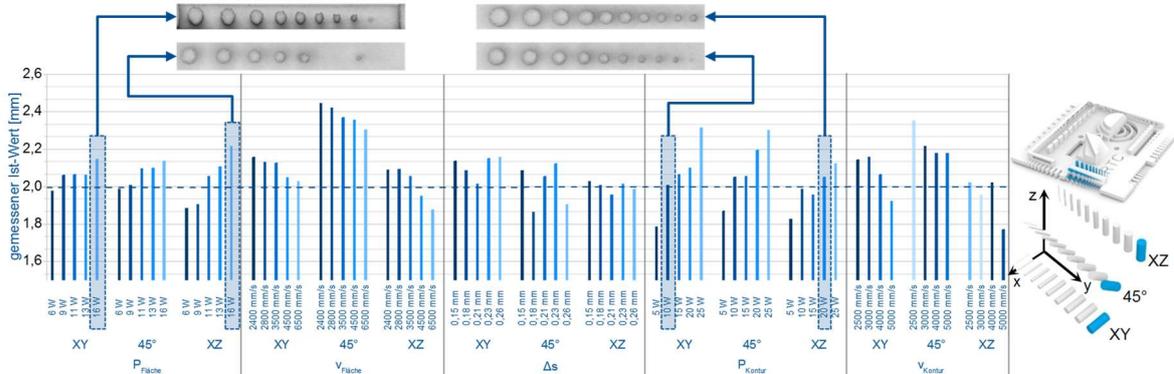


Bild 5-31 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf zylinderförmige Elemente

Die Analyse der zylinderförmigen Elemente in Bild 5-31 wurde um die Orientierung 45° zur Bauebene erweitert. Insgesamt zeigen sich hier, primär in höheren Energieeintragsbereichen, größere absolut gemessene Durchmesser und damit auch höhere Abweichungen im Vergleich zu der Fertigung in Baufortschrittsrichtung oder parallel zur Bauebene - ein Indiz dafür, dass Übersinterungseffekte abhängig von der Raumrichtung unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Auch hier zeigt ein zu hoch gewählter Energieeintrag höhere Abweichungen, wodurch die Elemente wachsen um bis zu 22,12 %. Durch einen zu gering gewählten Energieeintrag werden zylindrische Elemente $< 0,8 \text{ mm}$ hingegen nicht mehr dargestellt. Da die Schichtenanbindung zu gering ist, als dass die filigranen Elemente Belastungen, wie beispielsweise beim Entpacken der Bauteile, Stand halten könnten. Ein analoges Verhalten zeigt sich bei der Betrachtung darstellbarer Wandstärken, siehe Bild 5-32. Ein zu hoher

Energieeintrag macht sich hier durch ausgeprägte Verzugserscheinungen bemerkbar, indem sich die Kantenbereiche bei einer Orientierung parallel zur Bauebene nach oben wölben. Dadurch sind Abweichungen von bis zu 23,6 % zu verzeichnen.

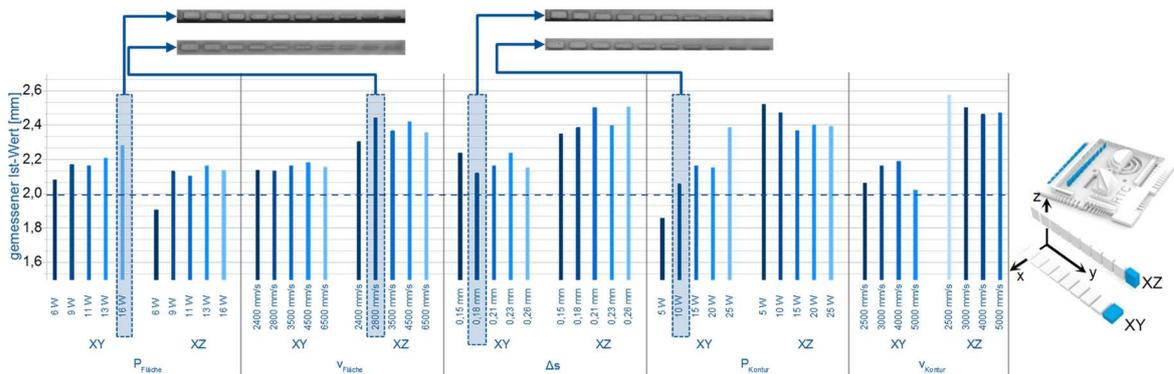


Bild 5-32 - Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf die darstellbaren Wandstärken

Grundsätzlich werden die Formelemente innerhalb der Fertigung mit einem geringeren Energieeintrag maßhaltig dargestellt. Die Erhöhung des Energieeintrags führt darüber hinaus zu erhöhten Schmelztemperaturen im Bauteil nach der Belichtung. Damit schmelzen mehr Partikel am Bauteilrand auf. Die Folge ist eine zunehmende Übersinterung ab einer Energiedichte von $E_{\text{Fläche}} = 1,3 \text{ J/cm}^2$, wodurch das Bauteil primär innerhalb der Bauebene aber auch in Baufortschrittsrichtung wächst. Weiter zeigt sich eine maßgebliche Beeinflussung durch die Orientierung der Formelemente. So weisen diese senkrecht zur Baufortschrittsrichtung bedingt durch die Schichtbauweise größere Formabweichungen auf. Lösungsansätze zur Formeinhaltung durch Anpassung der Geometrie werden beispielsweise von Reinarz angeführt [247].

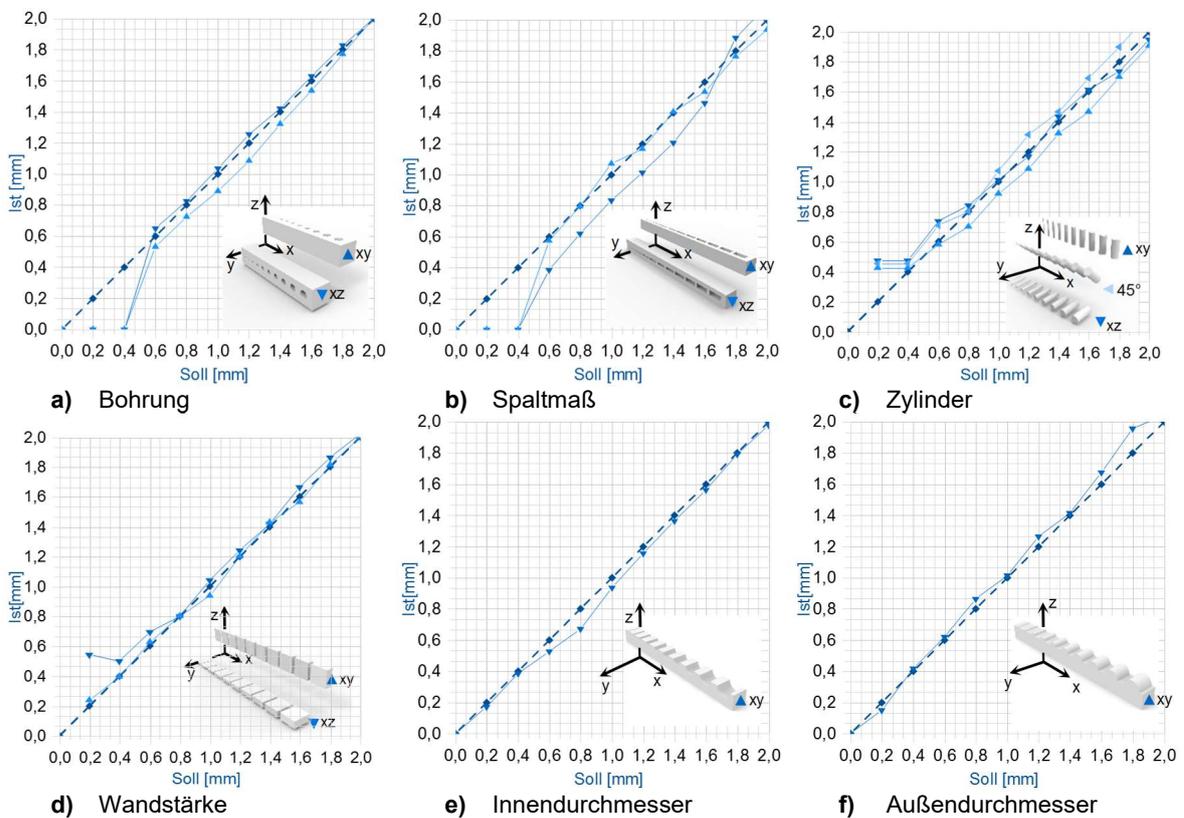


Bild 5-33 - Darstellbare Formelemente

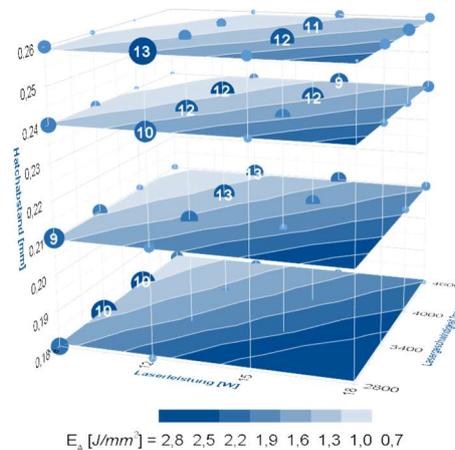
Aus den dargelegten Erkenntnissen wurden weitere Probenkörper mit einem optimierten Parametersatz ($P_{\text{Fläche}} = 12 \text{ W}$, $v_{\text{Fläche}} = 4000 \text{ mm/s}$, $\Delta s = 0,24 \text{ mm}$, $P_{\text{Kontur}} = 15 \text{ W}$, $v_{\text{Kontur}} = 2000 \text{ mm/s}$) gefertigt, um die Geometriebeschränkungen lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen aufzuzeigen. Die darstellbaren Geometrielemente sind in Bild 5-33 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass prinzipiell feine Strukturen mit dem Laser-Sinter-Prozess fertigbar sind. Explizit sind so Formelemente bis zu 0,6 mm herstellbar. Kleinere Elemente werden im Fall von extrudierten Körpern von der Größe des Laserfokus limitiert. So definiert die Anlagensoftware ab einem Wert kleiner 0,6 mm immer die gleiche Belichtungsstrategie. Die Folge sind konstante Abmaße der Größenmaßelemente. Weiter bieten solch kleine Elemente meist keine ausreichend hohe Stabilität und brechen teilweise beim Entpacken und Nachbearbeiten ab. Subtrahierte Elemente, wie beispielsweise Bohrungen oder auch Spaltmaße, können ebenfalls ab einem Durchmesser bzw. einer Höhe von kleiner 0,6 mm nicht dargestellt werden.

5.5 Optimiertes Prozessparameterfenster für Polypropylen

Die Ergebnisanalyse der durchgeführten Versuche belegt, dass optimale mechanische Eigenschaften sowie minimierte Oberflächenkennwerte und geringe Abweichungen der Form- und Maßhaltigkeit grundsätzlich gegenläufige Effekte darstellen. Ganz generell führen höhere Energieeinträge zu einer Reduktion der porösen Schichtstrukturen und somit zu dichteren Bauteilen und damit auch besseren mechanischen Eigenschaften. Allerdings zeigen sich hier auch zunehmend Übersinterungseffekte, da sich Pulverpartikel unkontrolliert an der Bauteiloberfläche aufschmelzen und somit sowohl die Oberflächengüte als auch Form- und Maßhaltigkeit herabsetzen. Somit geht die Optimierung der mechanischen Bauteileigenschaften mit einer Verschlechterung der geometrischen Produktspezifikationen einher.

Rz	Et	σ_M	ϵ_M
[μm]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[%]
		< 4	
90	2000	24	5,8
		< 3	
95	1850	23,5	5,6
		> 2	
100	1750	23	5,5
		< 1	
110	1700	22	5
		>	
		0	

a) Schema



b) Ganzheitliche Bewertung (141,5 °C)

Bild 5-34 - Ermittlung eines optimierten Parameterfensters

Zur Identifikation eines ganzheitlichen optimierten Prozessparameterfensters wird gemäß Bild 5-34 a) ein Bewertungsschema eingeführt, welches die betrachteten Zielgrößen bezüglich ihrer Größe in Abhängigkeit ihrer maximal erfassten Kennwerte einstuft. Das Bewertungsschema wird für jede Versuchskonfiguration innerhalb der modellgestützten Optimierung angewandt und entsprechend aufaddiert. Bild 5-34 b) zeigt die ganzheitliche Bewertung innerhalb der modellgestützten Optimierung bei einer Prozesskammertemperatur von $T_{PK} = 141,5 \text{ °C}$.

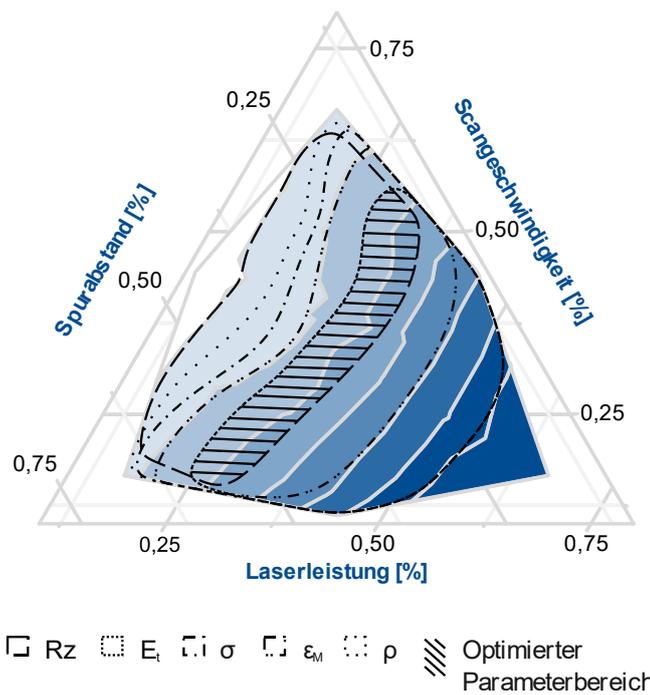


Bild 5-35 - Optimiertes Prozessparameterfenster

Wie zu erwarten, wird eine maximale Bewertung, also höchste Kennwerte innerhalb aller Zielgrößen, zu keinem Zeitpunkt erreicht. Die Maxima liegen hier bei 13 von 16 möglichen Punkten, welche global einer Flächenenergiedichte zuzuordnen sind. Hier ist zu beachten, dass diese durch eine nahezu beliebige Konfiguration der drei Parameter Laserleistung $P_{\text{Fläche}}$, Scangeschwindigkeit $v_{\text{Fläche}}$ sowie dem Spurabstand Δs realisiert werden kann. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden die Grenzen der Zielgrößen erfasst und die finale Parametereinstellung in Bild 5-35 ermittelt. Die hier aufgeführten prozentualen Beträge der drei Prozessgrößen beziehen sich auf die in der Versuchsplanung definierten Grenzen, siehe Tabelle 5-2.

6 ABBILDUNG DES MATERIALVERHALTENS LASERGESINTERTER BAUTEILE MITTELS FEM-ANALYSE

Resultierend aus den Erkenntnissen des vorangegangenen Kapitels 5.3.1 hat sich gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen aus Polypropylen durch ein anisotropes Verhalten gekennzeichnet sind. So zeigt sich ein weitestgehend identisches Verhalten der mechanischen Eigenschaften innerhalb der Schichtebene. Normal dazu, also in Baufortschrittsrichtung, werden jedoch abweichende Wertstoffkennwerte identifiziert. Bemerkbar macht sich dieses Verhalten zunächst innerhalb der Auswertung der Wirkungsanalyse. Dabei haben die mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Orientierungen grundsätzlich ähnliche Tendenzen gezeigt. Die Spannweite der einzelnen Faktoren ist in Relation stets vergleichbar. Die zusammenfassende Betrachtung aller Orientierungen ist indes jedoch von hohen Standardabweichungen geprägt und lässt somit einen hohen Einfluss der Orientierung vermuten.

6.1 Anisotropie der mechanischen Materialeigenschaften

Zur quantitativen Beschreibung des anisotropen Verhaltens werden die mechanischen Kennwerte von lasergesinterten Bauteilen aus Polypropylen mit dem im vorangestellten Kapitel 5.4 optimierten Parametersatz ($P_{Fläche} = 12 \text{ W}$, $v_{Fläche} = 4000 \text{ mm/s}$, $\Delta s = 0,24 \text{ mm}$, $P_{Kontur} = 15 \text{ W}$, $v_{Kontur} = 2000 \text{ mm/s}$) in verschiedenen Orientierungen ermittelt. Genauer werden Schulterzugstäbe (PKG_03) innerhalb der Grenzen $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ gemäß Bild 6-1 b) gefertigt und deren ermittelte Kennwerte in Bild 6-1 a) darstellt.

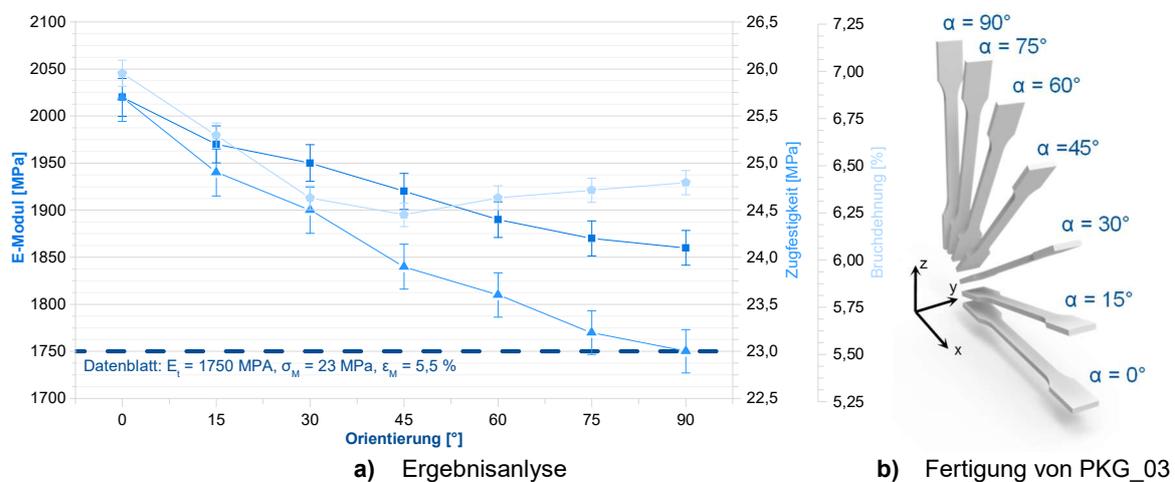


Bild 6-1 - Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit des Bauwinkels

Es zeigt sich, dass höchste Werte für E-Modul, Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei den zur Bauplattform parallel ausgerichteten Proben ($\alpha = 0^\circ$) erlangt werden. Explizit lassen sich in

Bezug auf den E-Modul maximale Werte von $E_{t_0^\circ} = 2020$ MPa erreichen, welche somit 15,43 % über denen der Herstellerangaben liegen. Mit steigenden Orientierungen sinkt der E-Modul jedoch um 8,6 % auf einen absoluten Wert von $E_{t_{90^\circ}} = 1860$ MPa ab. Analog zeigt sich eine maximale Zugfestigkeit von $\sigma_{0^\circ} = 25,7$ MPa bei einer Orientierung von $\alpha = 0^\circ$, welche hin zu einer Orientierung von $\alpha = 90^\circ$ auf die Herstellerangaben von $\sigma_{90^\circ} = 23$ MPa abfällt. Grundsätzlich ähnliche Tendenzen zeigen sich bei der Betrachtung der Bruchdehnung, dessen maximaler Wert von $\varepsilon_{M_0^\circ} = 6,99\%$ um 21,32 % über denen des Herstellers liegt. Im Gegensatz zu den bereits betrachteten mechanischen Kennwerten stellt sich hier bereits ab einem Fertigungswinkel von 45° ein Minimum ein, explizit sinkt die Bruchdehnung um 10,73 % und steigt mit einer weiteren Erhöhung auf $\varepsilon_{M_{90^\circ}} = 6,35$ % an.

Die Beobachtung der Anisotropie mechanischer Eigenschaften deckt sich grundsätzlich mit bereits durchgeführten Untersuchungen alternativer Materialien für den Laser-Sinter-Prozess, vergleiche Kapitel 2.7.2. Mit der in der Zielsetzung aufgezeigten Vision in Zukunft auch sicherheitsrelevante Bauteile im Laser-Sinterprozess zu fertigen, stößt die klassische technische Mechanik bei der Beachtung der Werkstoffnichtlinearitäten innerhalb einer Festigkeitsberechnung schnell an ihre Grenzen. Überlagerte Lastfälle, unterschiedliche Einspannbedingungen sowie geometrische Komplexität lasergesinterter Bauteile machen es der klassischen Mechanik darüber hinaus unmöglich komplexe elastomechanische Probleme ganzheitlich zu lösen. Daher werden bei entsprechenden Problemstellungen vereinfachte Modelle entwickelt, um die Zusammenhänge diskretisiert zu modellieren und somit eine Berechnung zu ermöglichen. Dabei ist die Übertragbarkeit auf die Realität jedoch genauestens zu überprüfen, da mit zunehmender Komplexität keine realitätsnahen Ergebnisse zu erwarten sind.

Gegenüber der traditionellen Vorgehensweise hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) als computerorientiertes numerisches Verfahren etabliert, welches sich maßgeblich zur Bearbeitung komplizierter, analytisch nicht berechenbarer Bauteile eignet. Wesentliche Grundlage für FEM-Berechnungen sind zum einen die Geometriedaten, welche in der Regel vom CAD-Modell übernommen werden können, sowie Randbedingungen, welche Belastungen und die entsprechenden Reaktionen verkörpern, und zum anderen Werkstoffdaten, welche vom Problem und der Formulierung des Materialgesetzes abhängig sind. Um das elastomechanische Verhalten lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen simulieren zu können, bedarf es eines Modells, welches das richtungsabhängige Verhalten beschreibt. Hierzu werden im Folgenden zunächst der grundlegende Aufbau und die Anforderungen an ein FEM-Modell herausgestellt. Darauf aufbauend erfolgt unter Einbeziehung der Erkenntnisse der bereits durchgeführten Versuche sowie dem Stand der Technik die mechanische Formulierung des richtungsabhängigen Materialverhaltens. Dabei ist zur Verwendung des Materialmodells neben der mechanischen Beschreibung auch die Bestimmung der Materialkennwerte nach ausgewählten Messverfahren notwendig. Das so erstellte Materialmodell wird anschließend validiert und kritisch bewertet.

6.2 Grundlegender Aufbau einer FEM-Simulation

Die Finite-Elemente-Methode ist seither zu einem wichtigen Werkzeug in den Ingenieurwissenschaften zur numerischen Lösung von Herausforderungen in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern gereift, welche sich von Problemstellungen innerhalb der Statik, Dynamik, Strömungslehre, Statik bis hin zur Wärmelehre, Akustik oder auch Crashverhalten erstrecken [248]. Dabei ist die FEM als eine Verkettung von verschiedenen Verfahren der Fachbereiche Mathematik, Numerik, Kontinuumsmechanik oder Strömungslehre, Werkstoffkunde und der Programmierertechnik zu verstehen [143]. Sie folgt dem Ziel, das Verhalten von nicht-diskreten Problemen näherungsweise mathematisch abzubilden und

vorherzusagen, also zu simulieren. Heute wird die FEM in den Ingenieurwissenschaften sehr verbreitet eingesetzt. Die Gründe für die weite Verbreitung sind einerseits die gestiegene Anwendbarkeit und zum anderen der erhebliche Nutzfaktor. Die Anwendbarkeit ist in der steigenden Leistungsfähigkeit von Computern und der Entwicklung nutzerfreundlicher FEM-Softwarelösungen und CAD-Schnittstellen begründet. Durch die Senkung von Entwicklungszeit, Entwicklungskosten und Produktionskosten sowie Materialeinsparung und Konstruktionsoptimierung ergibt sich der große Nutzen der FEM für den Ingenieur [249].

Die Vorgehensweise beim Ablauf einer FEM-Analyse ist eindeutig definiert und besteht gemäß Bild 6-2 aus den drei Schritten Pre-Prozessor, Solver und Post-Prozessor.

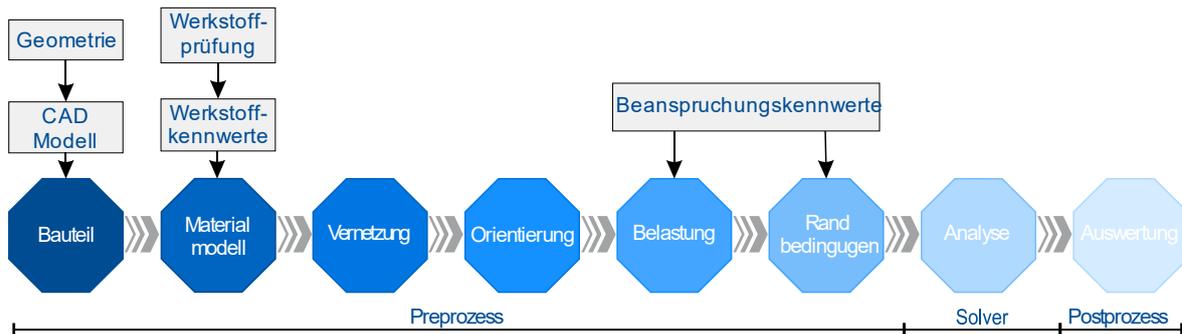


Bild 6-2 - Schematischer Ablauf einer FEM-Simulation

Der erste Schritt umfasst die Modellbildung, indem wesentliche Merkmale des realen Bauteils erfasst und idealisiert werden. Ausgangsbasis bildet, analog zur Prozesskette des Laser-Sinterns in Kapitel 2.3, das CAD-Modell. Je nach Komplexität ist es sinnvoll, konstruktive Gegebenheiten der Geometrie zu vernachlässigen, sollten diese für das Festigkeitsverhalten von geringerer Bedeutung sein, da diese die Netzgenerierung in der Regel erschweren. Genauer wird die Berechnungsgeometrie aus der Konstruktionsgeometrie herausgelöst und von der Umgebung isoliert. Das vereinfachte Analysemodell wird entweder direkt oder über eine Schnittstelle an das FE-System übergeben. Weiterhin wird ein Materialmodell definiert und mit Hilfe von zu ermittelnden Werkstoffkennwerten kalibriert. Ein großer Anteil bezieht sich auf kleine elastische Verformungen, prinzipiell können aber auch andere Materialgesetze, vergleiche Kapitel 6.3, beschrieben werden, deren Auswahl sich im Wesentlichen nach dem Anwendungsgebiet richtet. Aus der Bedingung, das reale Bauteil durch ein idealisiertes Modell aus finiten Elementen mathematisch formulierbar zu machen, existieren eine Vielzahl von unterschiedlichen Elementen. Dessen Anzahl zur Beschreibung des Bauteils und der expliziten Elementformulierung, das heißt die Anzahl der Knoten pro Element, beeinflussen die Lösung des Problems entscheidend. So wird je nach physikalisch-technischer Auslegung zwischen Elementen 1-dimensionalen (*Stabelemente*), 2-dimensionalen (*Flächenelemente*) und 3-dimensionalen (*Volumenelemente*) Verhaltens unterschieden, deren Wahl maßgeblich von der Beanspruchungsart abhängig ist und die Vernetzung vorgibt. In Abhängigkeit der Berechnungsgeometrie werden die Randbedingungen definiert, welche die Einleitung der auf das Bauteil wirkenden Lasten (Knotenkräfte, Momente, Druckkräfte, Streckenlasten, Schwingungen oder Temperaturgradienten) sowie der entsprechenden Reaktionen, beispielsweise auf Lagerungen, verkörpern.

Die innerhalb der Modellbildung definierten Geometriedaten, Werkstoffdaten und Randbedingungen werden an den Solver übergeben, auf dessen Basis zunächst die Steifigkeitsmatrizen eines jeden Elements aufgestellt werden. Diese werden in einem folgenden Schritt additiv zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix überlagert, welche gleichzeitig die Koeffizientenmatrix des Gleichungssystems darstellt [249].

Die Lösung des Gleichungssystems liefert die Verschiebung der einzelnen Knotenpunkte

und damit auch die Bauteildeformation. Für den ermittelten Gleichgewichtszustand werden auf Basis des Materialgesetzes an den Integrationspunkten die Zustandsgrößen wie Spannungen und Dehnungen ermittelt und innerhalb des Postprozesses ausgewertet.

6.3 Das Materialmodell

Zur Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens in der Finiten-Elemente-Methode bedarf es mathematischer Formulierungen der Zusammenhänge von Spannung, Dehnung, Zeit und Temperatur in Abhängigkeit definierter werkstoffspezifischer Materialparameter. Diese Formulierungen bilden das Materialmodell. Dabei gibt es typischerweise, insbesondere bei Kunststoffen, unterschiedlichste Materialmodelle, aus denen der Anwender je nach Simulationsaufgabe ein geeignetes auswählt. Prinzipiell besteht das Materialmodell dabei aus der mathematischen Beschreibung des Materialverhaltens sowie den Materialkennwerten. Es ist herauszustellen, dass die Auswahl eines Materialmodells immer einen Kompromiss aus der Genauigkeit, mit der das mechanische Werkstoffverhalten beschrieben wird und dem Aufwand zur Bestimmung der benötigten Materialkennwerte darstellt. In der Regel werden hier vereinfachte Annahmen bzw. Verallgemeinerungen als Randbedingungen definiert.

6.3.1 Genereller Aufbau des Materialmodells

Der Begriff Materialverhalten wird nicht bloß auf die Reaktion des Materials auf eine mechanische Belastung verstanden, obwohl das eine häufige Anwendung ist, sondern fasst auch jegliche anderweitige Auswirkung durch äußere Einflüsse zusammen. Dieser Definition folgend existiert in der Literatur eine große Anzahl an veröffentlichten Materialmodellen, deren Zusammenfassung und Bewertung innerhalb der vorliegenden Arbeit nicht zielführend ist. Vielmehr orientiert sich die folgende Diskussion an den verfügbaren Materialmodellen des kommerziellen FEM-Programms *Abaqus*, da dieses für die Beschreibung des Materialverhaltens lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen herangezogen wird.

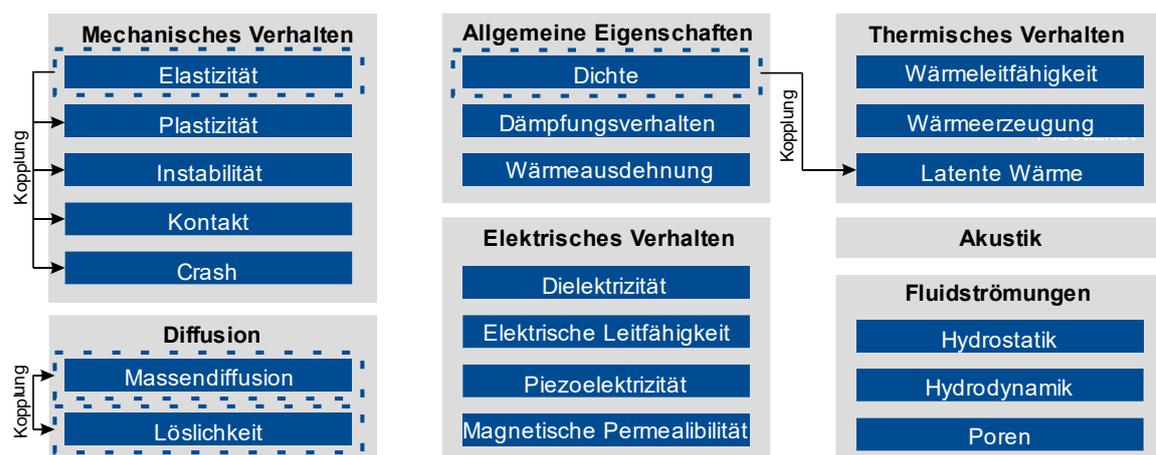


Bild 6-3 - Modulare Programmstruktur

Die Materialdatenbank der FEM-Software *Abaqus* bietet eine umfassende Auswahl sowohl an linearen und nichtlinearen als auch isotropen und anisotropen Materialverhalten. Prinzipiell ist das Materialmodell modular aufgebaut, wobei dessen Module zur bestmöglichen Beschreibung des realen Materialverhaltens miteinander kombiniert werden können, vergleiche Bild 6-3. Unter der Definition eines Moduls wird das Integrieren von geeigneten mathematischen Beschreibungen für das spezielle Werkstoffverhalten verstanden. Dabei sind manche Materialverhalten an andere gekoppelt und setzen die Verwendung eines anderen

Moduls voraus, während sich bestimmte Materialverhalten wiederum untereinander anschließen und nicht gemeinsam in einem Modell definiert werden können.

Prinzipiell werden Module, die für ein Material definiert sind, aber für die Berechnungsaufgabe nicht benötigt werden, ignoriert. Da die Definition eines bestimmten Materialverhaltens mit hohem Aufwand und Kosten verbunden ist, vor allem wenn dazu Materialuntersuchungen durchgeführt werden müssen, werden daher nur diejenigen Module definiert, die tatsächlich für die vorliegende Berechnungsaufgabe benötigt werden. Der modulare Aufbau des Materialverhaltens in der FEM-Software bietet dabei prinzipiell den Vorteil, dass das Materialmodell bei neuen Berechnungsaufgaben durch weitere Module ergänzt werden kann. So kann das Materialmodell mit zunehmenden Anforderungen und Berechnungsaufgaben nach und nach vervollständigt werden.

6.3.2 Beschreibung des mechanischen Lastzustands

Die Wahl des geeigneten Moduls bzw. der geeigneten Module richtet sich nach der Berechnungsaufgabe - die Definition eines Materialmodells fokussiert sich innerhalb der vorliegenden Arbeit gemäß der aufgezeigten Problematik des anisotropen Verhaltens auf das mechanische Verhalten. Die Auswahl eines zur Berechnungsaufgabe geeigneten Materialmodells lässt sich unter anderem anhand definierter Kategorien wie der Belastungszeit, dem Lastverlauf und den Berechnungsgrößen treffen [143], vergleiche Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1 - Klassifizierung der Materialmodelle, in Anlehnung an [143]

Zeitraum der Belastung	Lastverlauf	Anwendungsbeispiel	Berechnungsgröße	Module
X < 1 sec. „crash“	stoßartig, monoton	Stoßbelastung auf eine Haube	Kräfte/Wege, Beschleunigungen, Energiewerte	Elastisch/Plastisch, viskoelastisch
1s < x < 1h „Kurzzeit“	monoton steigend	Montagevorgang eines Schnapphakens	Kräfte, Deformationen, Beanspruchungen	Linear elastisch, Elastisch/Plastisch
1h < x „Langzeit“	konstant oder langsam steigend	Rohrleitung unter Innendruck	Beanspruchungen, Deformationen, Kräfte	Linear elastisch, Kriechmodell, viskoelastisch
n*x „periodisch“	schwingend, zyklisch	Betriebslastverläufe, Be- und Entlastung	Kräfte/Wege, Beanspruchungen, Übertragungsverhalten, Eigenerwärmung	viskoelastisch

Für eine kurzzeitige, einmalige Belastung lässt sich das mechanische Verhalten von Bauteilen mit einem elastischen Materialmodell verhältnismäßig gut beschreiben, obwohl Kunststoffe im Allgemeinen ein ausgeprägtes nichtlinear-viskoelastisches Verhalten aufweisen. Das Materialverhalten unterliegt im Fall des linear-elastischen Ansatzes dem Hook'schen Gesetz, d. h. der Elastizitätsmodul ist im elastischen Bereich konstant. Prinzipiell ist dieses Modell nur im Bereich kleiner zu erwartender Dehnungen anwendbar. Darüber hinaus sind die Abweichungen der Spannungs-/Dehnungskurve zu groß.

Die Beschreibung von plastischen und viskosen Effekten resultiert im elastisch-plastischen Materialmodell, bei dem sich das Material bis zur Fließgrenze linear bzw. ideal-elastisch verhält und sofern bei einer weiteren äußeren Krafteinwirkung eine Verformung erfolgt, dem plastischen Materialverhalten unterliegt.

Prinzipiell bleibt hier in bisher aufgeführten Modellen der Faktor Zeit unberücksichtigt. Es werden demnach weder unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten noch Belastungszeiträume erfasst. Die Beschreibung des Materialverhaltens von Kunststoffen unter langzeitigen konstanten Lasten erfolgt unter anderem durch *Kriechmodelle* oder *viskoelastische Modelle*, je nachdem, ob das Belastungsniveau zu irreversiblen Deformationen führt oder nicht. Letzteres Modell kann zudem sowohl für die dynamisch-stoßartige Belastung, kurz Crash, als auch für die dynamisch-zyklische Belastung eingesetzt werden.

Gemäß der Zielsetzung soll das richtungsabhängige elastische Materialverhalten beschrieben werden. Grundlage dafür ist die Definition des elastischen Materialverhaltens mit gleichnamigen Modul. Wie in Bild 6-3 dargestellt, bildet das elastische Materialverhalten zwangsweise immer den Grundstein eines Materialmodells für Spannungs-/Dehnungs- bzw. Verformungsanalysen und nimmt daher eine herausragende Stellung in der Beschreibung des Materialverhaltens mittels FEM-Analyse ein.

6.3.3 Beschreibung elastomechanischer Probleme

Unter der Definition eines Moduls wird das Integrieren von geeigneten mathematischen Beschreibungen für das spezielle Werkstoffverhalten verstanden. In Abhängigkeit des elastomechanischen Problems stehen prinzipiell eine Reihe vordefinierter mathematischer Beschreibungen zur Verfügung, welche das jeweilige Werkstoffverhalten abbilden soll. Diese werden in Anlehnung an [250] in die folgenden Modelle unterteilt.

- Lineare Elastizität
- Poröse Elastizität
- Hypoelastizität
- Hyperelastizität
- Belastungsinduzierte Entfestigung bei Elastomeren
- Lineare Viskoelastizität
- Nicht-Lineare Viskoelastizität

So lassen sich geometrisch und physikalisch lineare Probleme im Rahmen der linearen Elastizität beschreiben. Darüber hinaus können Nichtlinearitäten, wie im Falle von porösen Strukturen, oder Hyperelastizitäten zur Abbildung großer Dehnungen, beispielsweise bei Elastomeren, abgebildet werden. Die vollständige Beschreibung aller elastomechanischen Probleme ist hier nicht zielführend, da sich das vorliegende Problem eindeutig der linearen Elastizität zuordnen lässt. Daher wird an dieser Stelle an die weiterführende Literatur verwiesen: [209], [143], [249], [251].

Die lineare Elastizität wird der Klasse der skleronomen (zeitunabhängigen) Materialmodelle zugeordnet. Damit ist das Formveränderungsverhalten nur von der Belastungsgröße, nicht aber von deren Geschwindigkeit abhängig. Weiter ist das elastische Materialverhalten dadurch gekennzeichnet, dass die Be- und Entlastung im einachsigen Spannungszustand stets entlang des gleichen Weges erfolgt. Alle in Folge äußerer Wirkungen entstandenen Verzerrungen verschwinden bei der Wiederherstellung des spannungslosen Ausgangszustandes. Die aufgewendete Verformungsarbeit wird vollständig als Verzerrungsenergie im Körper gespeichert. Somit ist die Arbeit reversibel. Damit dient als Ausgangspunkt für die Beschreibung des elastischen Materialverhaltens das in Formel 4-7 postulierte Hook'sche Gesetz. Unter der resultierenden Voraussetzung kleiner Verzerrungen folgt in Indexschreibweise daraus:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \text{ bzw. } \varepsilon_{ij} = N_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad \text{Formel 6-1}$$

Dabei ist E_{ijkl} der Elastizitätstensor und N_{ijkl} der Nachgiebigkeitstensor. Sowohl bei E_{ijkl} als auch bei N_{ijkl} handelt es sich um Tensoren der 4. Stufe, welche als vierdimensionale Matrix mit drei Komponenten in jeder der vier Richtungen angesehen werden kann und somit

$3^4 = 81$ Komponenten enthält. Um die Gleichgewichtsbedingung aufzustellen, folgen weiterhin die Beziehungen:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{zy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \text{ bzw. } [\varepsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{zy} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \delta_{zy} \\ \delta_{xy} \\ \delta_{xz} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 6-2}$$

6.3.4 Beachtung der richtungsabhängigen Materialeigenschaften

Für die Lösung der Berechnungs- und Simulationaufgaben ist es von großer Bedeutung, ob die Eigenschaften der Materie ort- und/oder richtungsabhängig modelliert werden können. Das Problem der richtungsabhängigen Materialeigenschaften innerhalb des Laser-Sinter-Prozesses wurde bereits in der einschlägigen Literatur erkannt, als Haupteinflussfaktor wird hier das verfahrensbedingte Schichtbauprinzip identifiziert. Zur Integration der Richtungsabhängigkeit der Bauteileigenschaften in das Materialmodell existieren zwei grundsätzliche Ansätze, welche unter der Voraussetzung einer realitätsnahen Beschreibung sowie einem vertretbaren und überschaubaren experimentellen Aufwand zur Ermittlung der notwendigen Materialkennwerte unterschiedlich gut geeignet sind.

Innerhalb des inhomogenen Ansatzes sind die Materialeigenschaften im Inneren eines Körpers in jedem Punkt unterschiedlich. Treten unterschiedliche Phasen auf, wird der Körper als heterogen bezeichnet. Da lasergesinterte Bauteile ein isotropes mechanisches Werkstoffverhalten innerhalb der Bauebene, aber ein davon abweichendes Verhalten in Baufortschrittsrichtung aufzeigen, liegt es nahe, das richtungsabhängige Verhalten innerhalb eines heterogenen Modells über die Modellierung einzelner, klar definierter Schichten zu modellieren. Diesbezügliche Überlegungen wurden bereits auf theoretischer Ebene von Blattmeier durchgeführt, ohne diese in die FEM zu übertragen [114]. Die hier aufgestellte Theorie besagt, dass durch das Verbinden einzelner Schichten einige Bereiche mehrfach belichtet werden, andere jedoch nur einzeln. Durch die deshalb einfach und mehrfach belichteten Volumenelemente ergeben sich Schichten unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften. Lässt sich so das Materialverhalten in erster Instanz ausreichend gut erklären, ergeben sich für die Überführung in ein Materialmodell für die Finite-Elemente-Methode große Herausforderungen. Neben der Tatsache des stark vereinfachten Modells unter Vernachlässigung beispielsweise der Querkontraktionszahl, müssen für die sich unterscheidenden Bauteilschichten separate Materialkennwerte erfasst werden. Da die Materialeigenschaften allerdings erst innerhalb des Herstellungsprozesses entstehen, offenbart sich das eigentliche Problem, die Einzelschichten getrennt voneinander zu betrachten. Weiter bedarf es komplexer mechanischer Zusammenhänge über die Interaktion der Schichten miteinander. Darüber hinaus führt die stetige Weiterentwicklung des Verfahrens zu einer steigenden Homogenität der Bauteile. Somit bewegt sich die Forschung klar von dem schichtweisen Modellierungsansatz weg. Damit gewährleistet der heterogene Materialansatz ein zunächst realitätsnahes Materialverhalten, durch den theoretischen experimentellen Aufwand erscheint die Herangehensweise allerdings zunächst als zu komplex. Innerhalb des homogenen Ansatzes haben alle materiellen Punkte eines Körpers unter den gleichen Bedingungen gleiche physikalische Eigenschaften. Der Körper besitzt somit ortsunabhängige Eigenschaften. Richtungsabhängigkeiten werden durch Symmetriebedingungen definiert. Grundsätzlich ist herauszustellen, dass es auf atomarer Ebene keine perfekt homogenen Körper gibt. Da die Unterschiede der physikalischen Eigenschaften auf makroskopischer Ebene jedoch so klein sind, werden sie in der Regel vernachlässigt. In der Praxis wird dann von Homoge-

nität ausgegangen [251]. Ein zu simulierendes Laser-Sinterbauteil wird somit als ein Kontinuum betrachtet, dessen Werkstoffeigenschaften überall gleich sind. Die einzelnen Pulverpartikel sind demnach im Laser-Sinterprozess gleichmäßig und einheitlich miteinander verbunden worden. Da in diesem Modell also keine Schichten mehr vorhanden sind, müssen die richtungsabhängigen Materialeigenschaften global auf jede Stelle des Kontinuums übertragen werden. Jede Stelle des Bauteils zeigt dann dasselbe richtungsabhängige Verhalten wie das Gesamtbauteil. Das in Formel 6-1 aufgestellte verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz gilt für anisotropes, linear-elastisches Materialverhalten und setzt somit geometrische und physikalische Linearität voraus. Aus experimenteller Sicht ist es jedoch nicht möglich die insgesamt 81 enthaltenen Komponenten des Elastizitäts- bzw. Nachgiebigkeitstensors zu bestimmen, da die mechanische Werkstoffprüfung schlichtweg nicht genug Grundversuche bereitstellt. Da die 81 Komponenten zum einen nicht alle unabhängig voneinander sind und die Hooke'schen Tensoren als symmetrisch vorausgesetzt werden, kann eine erste Reduktion auf 36 linear-unabhängige Koordinaten erfolgen. Weiter wird vorausgesetzt, dass die Verformungsarbeit vollständig im Körper gespeichert ist und wieder freigesetzt werden kann. Daraus folgen die in folgender Formel 6-3 dargestellten weiteren Symmetriebedingungen.

$$E_{ijkl} = E_{jikl} = E_{ijlk} = E_{klij} \text{ bzw. } N_{ijkl} = N_{jikl} = N_{ijlk} = N_{klij} \quad \text{Formel 6-3}$$

Damit reduziert sich die Anzahl voneinander unabhängiger Elemente auf 21. Formel 6-4 zeigt die aus den Symmetriebedingungen resultierende Nachgiebigkeitsmatrix für allgemein anisotropes Material.

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} N_{xxxx} & N_{xxyy} & N_{xxzz} & N_{xxyz} & N_{xxxz} & N_{xxxxy} \\ & N_{yyyy} & N_{yyzz} & N_{yyyz} & N_{yyxz} & N_{yyxy} \\ & & N_{zzzz} & N_{zzyz} & N_{zzxz} & N_{zzxy} \\ & & & N_{yzyz} & N_{yzxz} & N_{yzxy} \\ & sym & & & N_{xzzz} & N_{xzzxy} \\ & & & & & N_{xyxy} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 6-4}$$

In vielen technisch relevanten Anwendungen, so auch im vorliegenden Fall der Abbildung des Materialverhaltens lasergesinterter Bauteile, liegt keine vollständige Anisotropie mit 21 voneinander unabhängigen Koordinaten vor.

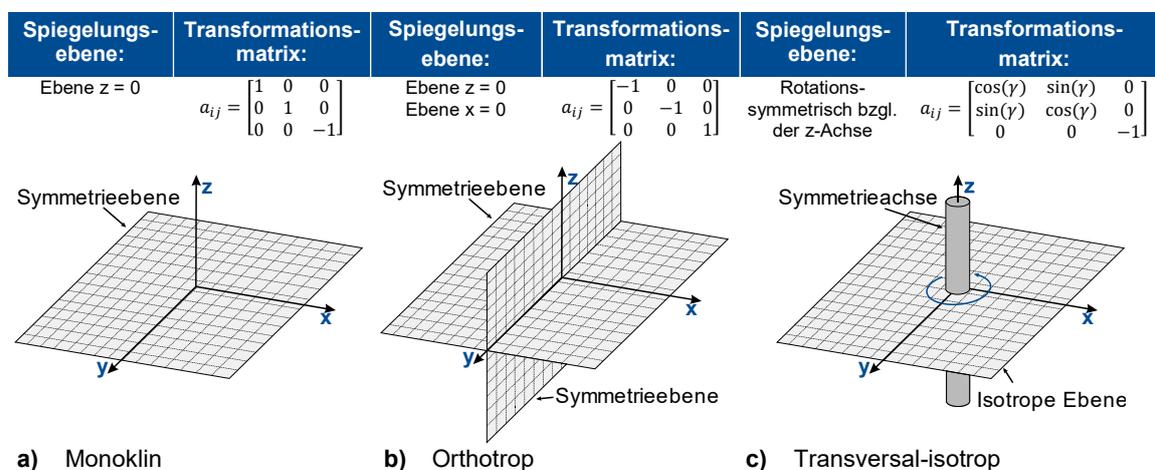


Bild 6-4 - Materialverhalten der Subklassen der Anisotropie

Durch die Einarbeitung von Materialsymmetrien ist es möglich, wesentliche Vereinfachungen der Materialmodellgleichungen und damit eine weitere Reduktion der Koordinaten zu

erreichen. Prinzipiell lassen sich diese der Anisotropie untergeordneten Sonderfälle des *monoklinen*, *orthotropen* und *transversal-isotropen* Materialverhaltens gemäß Bild 6-4 durch Drehungen und Spiegelungen beschreiben. Monoklines Materialverhalten liegt vor, wenn im Material eine Symmetrieebene existiert, etwa die in Bild 6-4 a) dargestellte Ebene $z = 0$ (y-x-Ebene). Beispielhaft haben somit zwei symmetrisch zur Ebene $z = 0$ herausgeschnittene Proben die gleichen Materialeigenschaften. Den Bedingungen der Transformation folgend, dass sich die Materialeigenschaften auf ein entsprechend gespiegeltes Koordinatensystem nicht ändern dürfen, ergibt sich:

$$\begin{aligned} E_{xxyy} &= E_{xxzz} = E_{yyyy} = E_{yyxz} = E_{zzyy} = E_{zzxy} = E_{yzzz} = E_{yzyy} = 0 \\ N_{xxyy} &= N_{xxzz} = N_{yyyz} = N_{yyxz} = N_{zzyz} = N_{zzxy} = N_{yzzz} = N_{yzyy} = 0 \end{aligned} \quad \text{Formel 6-5}$$

Somit enthält der Nachgiebigkeitstensor für monoklines Materialverhalten $21 - 8 = 13$ unabhängige Materialkonstanten. Durch die Wahl einer alternativen Symmetrieebene verändern sich sowohl Elastizitäts- als auch Nachgiebigkeitsmatrix.

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} N_{xxxx} & N_{xxzz} & N_{xxyy} & 0 & 0 & N_{xxyy} \\ & N_{zzzz} & N_{yyyz} & 0 & 0 & N_{yyxy} \\ & & N_{yyyy} & 0 & 0 & N_{zzxy} \\ & & & N_{yzyz} & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & N_{xyxy} & N_{xyxz} \\ & & & & & N_{xzzz} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 6-6}$$

Die Orthotropie beschreibt die Einschränkung der Anisotropie auf Grund orthogonaler Symmetrieebenen. Genauer ist das Materialverhalten dann orthotrop, wenn es mindestens zwei orthogonal zueinander stehende Symmetrieebenen besitzt, etwa wie in Bild 6-4 b) dargestellt, die Ebenen $x = 0$, $y = 0$ und $z = 0$. Durch die Invarianz des Hook'schen Gesetzes und die definierten Symmetrieebenen ergeben sich folgende zusätzliche Bedingungen:

$$\begin{aligned} E_{xxyy} &= E_{yyxy} = E_{zzxy} = E_{xyxz} = 0 \\ N_{xxyy} &= N_{yyxy} = N_{zzxy} = N_{xyxz} = 0 \end{aligned} \quad \text{Formel 6-7}$$

Daraus folgend ist ein orthotropes Material durch $13 - 4 = 9$ unabhängige Werkstoffparameter definiert. Liegen die Symmetrieebenen nicht auf den Koordinatenachsen, sind sowohl Elastizitäts- als auch Nachgiebigkeitstensor voll besetzt. Ihre Komponenten lassen sich dennoch über neun Ingenieurkonstanten ausdrücken. Die Nachgiebigkeitsmatrix zur Beschreibung des orthotropen Materialverhaltens ist in folgender Formel aufgeführt.

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} N_{xxxx} & N_{xxyy} & N_{xxzz} & 0 & 0 & 0 \\ & N_{yyyy} & N_{yyzz} & 0 & 0 & 0 \\ & & N_{zzzz} & 0 & 0 & 0 \\ & & & N_{yzyz} & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & N_{xzzz} & 0 \\ & & & & & N_{xyxy} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 6-8}$$

Wenn das orthotrope Material sich invariant gegenüber einer beliebigen Drehung um eine Achse erweist, im Fall von Bild 6-4 c) ist dies die z-Achse, so verhält sich das Material transversal-isotrop. In Folge des Ersetzens der Symmetrieebenen durch eine Symmetrieachse entsteht eine isotrope Ebene mit diesbezüglicher Anisotropie in senkrechter, also

transversaler Richtung. Das Material verhält sich also in der isotropen Ebene in jeder Richtung gleich, während es in transversaler Richtung abweichendes Verhalten zeigt. Unter der Voraussetzung, dass alle elastischen Eigenschaften um eine Symmetrieachse gleichberechtigt sind, gelten folgende Beziehungen zwischen den elastischen Konstanten:

$$E_{xxxx} = E_{yyyy}, E_{xxzz} = E_{yyzz}, E_{zzzz} = E_{zyzy}, E_{xyxy} = \frac{1}{2}(E_{xxxx} - E_{xyyy})$$

bzw.

$$N_{xxxx} = N_{yyyy}, N_{xxzz} = N_{yyzz}, N_{zzzz} = N_{zyzy}, N_{xyxy} = \frac{1}{2}(N_{xxxx} - N_{xyyy})$$

Formel 6-9

Die Anzahl der benötigten Kennwerte reduziert sich demnach auf $9 - 4 = 5$. In einem Koordinatensystem, bei dem die z-Achse, vergleiche Bild 6-4 c), die Symmetrieachse ist, hat der Nachgiebigkeitstensor die in Formel 6-10 dargestellte Struktur.

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} N_{xxxx} & N_{xxyy} & N_{xxzz} & 0 & 0 & 0 \\ & N_{xxxx} & N_{xxzz} & 0 & 0 & 0 \\ & & N_{zzzz} & 0 & 0 & 0 \\ & & & N_{zyzy} & 0 & 0 \\ & sym & & & N_{zyzy} & 0 \\ & & & & & \frac{(N_{xxxx} - N_{xxyy})}{2} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 6-10}$$

Die simpelste Form der linearen Elastizität ist der isotrope Spannungszustand. Ein Werkstoff ist genau dann isotrop, wenn seine mechanischen Eigenschaften in allen Raumrichtungen gleich sind, also alle Richtungen im Material in Bezug auf die elastischen Eigenschaften gleichberechtigt sind. Isotrope Tensoren sind dadurch gekennzeichnet, dass sich ihre Komponenten bei einer beliebigen Drehung des zugrunde gelegten kartesischen Koordinatensystems nicht ändern. Die elastischen Eigenschaften lassen sich komplett durch den *Elastizitätsmodul* E_t sowie die *Querkontraktionszahl* ν beschreiben, siehe Formel 6-11.

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} N_{xxxx} & N_{xxyy} & N_{xxyy} & 0 & 0 & 0 \\ & N_{xxxx} & N_{xxyy} & 0 & 0 & 0 \\ & & N_{xxxx} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{(N_{xxxx} - N_{xxyy})}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{N_{xxyy} - N_{xxyy}}{2} & 0 \\ & sym & & & & \frac{N_{xxxx} - N_{xxyy}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 6-11}$$

Weitere Sonderfälle des anisotropen Materialverhaltens sind denkbar, deren Beschreibung ist an dieser Stelle allerdings nicht zielführend. Diese können der allgemeinen Literatur entnommen werden, siehe [143], [249] und [251].

Unter Voraussetzung der beobachteten anisotropen Materialeigenschaften aus Kapitel 6.1 bietet der homogene Modellierungsansatz in Kombination mit den aufgeführten Subklassen der Anisotropie hohes Potential zur realitätsnahen Abbildung des Materialverhaltens lasergesinteter Bauteile. Genauer entspricht das transversal isotrope Materialverhalten dem des gesuchten Materialverhaltens. Weiter wird der Ansatz bereits erfolgreich in anderen Gebieten, welche ein grundsätzlich ähnliches Materialverhalten aufweisen, etwa in der Simulation von Knochen oder Schiefergestein, eingesetzt. Auch verfügbare wissenschaftliche Arbeiten, vergleiche Kapitel 2.7.1, stützen die Klassifizierung des Materialverhaltens, wobei eine Übertragung in die Finite-Elemente-Analyse nicht durchgeführt wurde.

Unter Betrachtung der bekannten Beziehungen aus Formel 4-3 bis Formel 4-8 können die Ingenieurkonstanten in den Nachgiebigkeitstensor des transversal-isotropen Materialmodells eingesetzt werden. Damit reduziert sich der Nachgiebigkeitstensor zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens auf insgesamt fünf unabhängige Materialkennwerte und kann durch den *Elastizitätsmodul* in *x-Richtung* E_x sowie in *z-Richtung* E_z , die *Querkontraktionszahlen* ν_{xy} und ν_{zx} und letztendlich dem *Schubmodul* G_{xz} vollständig beschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{xz}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ & \text{sym} & & & & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} \quad \text{Formel 6-12}$$

6.4 Modellierung des uniaxialen Zugversuches

Zur Bestätigung der Theorie, dass das transversal isotrope Materialmodell geeignet ist das richtungsabhängige Materialverhalten lasergesinterter Bauteile zu beschreiben, werden eine Reihe von Simulationen in der FEM-Software Abaqus durchgeführt. Grundlage bildet der uniaxiale Zugversuch. Dessen Zugbeanspruchung wird demnach durch einen statischen, durch Volumen- und Oberflächenkräfte belasteten, materialhomogenen, anisotropen, linear-elastischen Körper beschrieben. Die Vorgehensweise gliedert sich hierbei nach dem in Bild 6-2 geschilderten Ablauf zum Aufbau einer FEM-Simulation.

6.4.1 Preprozess

Die Modellierung erfolgt prinzipiell modulweise, dessen wichtigste Module im Folgenden detaillierter beleuchtet werden sollen. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei an den schematischen Ablauf, wie er in Bild 6-2 dargestellt und in Kapitel 6.2 beschrieben ist.

- **Parts**

Innerhalb des Versuchs mit konstanter uniaxialer Zugbelastung werden Schulterzugstäbe vom Typ A mit einer Gesamtlänge von 170 mm nach DIN EN ISO 3167 eingesetzt, vergleiche Bild 4-7. Dabei werden die beiden Backen an den Enden des Zugstabes lediglich zum Einspannen in die Zugprüfmaschine und zum Sicherstellen einer uniformen Spannungsverteilung im quaderförmigen Mittelstück herangezogen. Bei der Zugprüfung finden die Messungen zur Längen- und Breitenänderung nur auf diesem Mittelstück statt. Daher wird im Zuge der Simulation auch nur das quaderförmige Mittelstück mit den Abmessungen 80 mm x 10 mm x 4 mm herangezogen.

Material

Wie bereits in Kapitel 6.3.1 beschrieben, sind die Materialmodelle modular aufgestellt und können mit Einschränkungen miteinander kombiniert und immer weiter aufgebaut werden.

Die Software Abaqus bietet zunächst keine direkte Auswahlmöglichkeit für das Materialmodell linearer Elastizität mit transversaler Isotropie. Als Subklasse der Orthotropie wird daher das orthotrope Materialmodell gewählt, welches die Eingabe von insgesamt neun Kennwerten erfordert, wobei vier Kennwerte durch Symmetriebedingungen des transversal isotropen Materialverhaltens hergeleitet werden. Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls in transversaler Richtung E_x sowie der Querkontraktionszahl zwischen transversaler Richtung und isotroper Ebene ν_{xy} werden Schulterzugstäbe parallel zur Bauebene gefertigt. Die Erfassung des Elastizitätsmoduls in der isotropen Ebene E_z und der Querkontraktionszahl in der isotropen Ebene ν_{zx} erfolgt analog durch die Fertigung von Schulterzugstäben in Baufortschrittsrichtung. Alle Kennwerte werden gemäß Abschnitt 4.2.2 im Zugversuch nach DIN 527 durch die Firma *Polymer Service GmbH Merseburg* erfasst. Zur Bestimmung der Querkontraktionszahlen wird dabei zusätzlich zur Längsdehnung die Querdehnung über Dehnungsmessstreifen erfasst. Die Bestimmung des Schubmodul G_{xz} erfolgt durch einen Torsionspendelversuch nach DIN 6721-6-A. Der Probenkörper, dessen Querschnitt mit dem des Schulterzugstabes *PKG_03* übereinstimmt, wird ebenfalls in Baufortschrittsrichtung orientiert. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Bild 6-5 dargestellt.

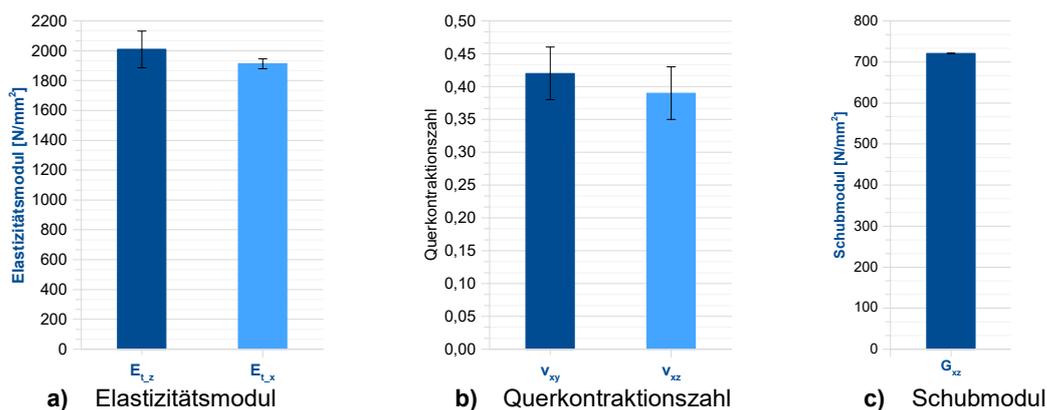


Bild 6-5 - Experimentell ermittelte Werkstoffkennwerte zur Aufstellung des FEM-Modells

Der Elastizitätsmodul in y-Richtung bestimmt sich durch die Symmetriebedingung $E_{t,x} = E_{t,y} = 2009 \text{ N/mm}^2$. Die Querkontraktionszahl ν_{xz} leitet sich aus folgender Bedingung ab:

$$\nu_{xz} = E_{t,x} \frac{\nu_{zx}}{E_{t,z}} = 1913 \frac{0,39}{2009} = 0,3714 \quad \text{Formel 6-13}$$

Weiter folgen durch die Symmetriebedingungen $\nu_{yz} = \nu_{zx} = 0,38$ und analog für den Schubmodul $G_{yz} = G_{xz} = 721 \text{ N/m}^2$. Der Schubmodul G_{xy} bestimmt sich durch:

$$G_{xy} = \frac{E_{t,x}}{2(1 - \nu_{yx})} = \frac{2009}{2(1 + 0,42)} = 707 \text{ N/m}^2 \quad \text{Formel 6-14}$$

Alle aus den Prüfungen der uniaxialen Zugversuche und Torsionspendelversuche sowie aus den Symmetriebedingungen hergeleiteten Kennwerte sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst und können direkt zur Beschreibung des transversal isotropen Materialverhaltens als Subklasse des orthotropen Materialmodells herangezogen werden.

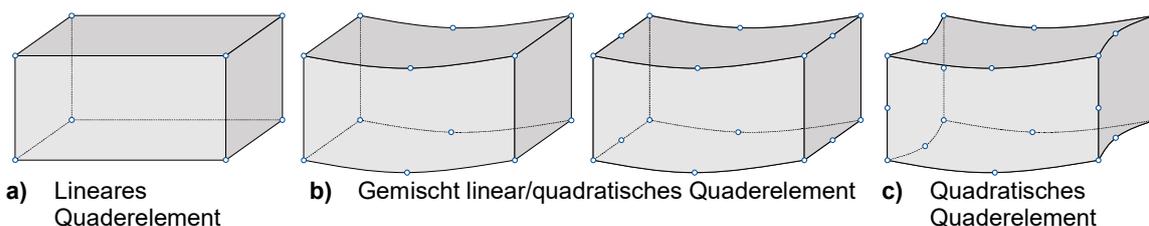
Tabelle 6-2 - Zusammengefasste Werkstoffkennwerte des orthotropen Materialmodells

Nomenklatur Dissertation	E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}
Nomenklatur Abaqus	E1	E2	E3	Nu12	Nu13	Nu23	G12	G13	G23
Einheit	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	-	-	-	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Wert	2009	2009	1913	0,42	0,37	0,37	707	721	721

▪ Vernetzung

Die Auswahl geeigneter Elemente ist von hoher Komplexität, deren Festlegung sich an die Ansprüche der geometrischen Abbildung sowie der physikalisch-technischen Beschreibung des Projektes richtet. Dabei wird das Elementverhalten durch die Elementfamilie, die Freiheitsgrade, die Anzahl der Knoten, die Elementformulierung sowie die Integration maßgeblich beeinflusst. Erstere ist direkt mit der Dimensionierung des mit ihr simulierten Verhaltens eindeutig zugewiesen. Unter definierten Voraussetzungen und Annahmen ist die Modellierung dreidimensionaler Körper durch zweidimensionale Elemente möglich, um beispielsweise die Rechenleistung zu verringern [252]. So muss sowohl die Belastung als auch das Materialverhalten in der Ebene der betrachteten Fläche liegen und über die Dicke des Körpers konstant sein - ein Widerspruch zur Theorie des transversal isotropen Materialmodells.

Demnach wird ein Element aus der Familie der dreidimensionalen Volumenkörper benötigt, welche sich allgemein in Tetraeder-, Quader- und Prisma-Elemente unterteilen. Bei der Wahl des Volumenelements ist das Quaderelement generell zu bevorzugen, was auf Grund der Komplexität der Geometrie nicht immer möglich ist. Somit ist bei der Betrachtung lasergesinterter Bauteile mit Hilfe der FEM-Analyse die Kombination mit weiteren Volumenelementen je nach vorliegender Geometrie wahrscheinlich. Bei der Formulierung des vorliegenden Problems ist die Modellierung durch Quaderelemente jedoch uneingeschränkt möglich. Über die Geometrie ist gleichzeitig die Mindestanzahl der zur Elementdefinition erforderlichen Knoten definiert, in denen das Element exakt beschrieben ist. So bestimmt die Anzahl der Knoten entlang der Elementkante den Polynomgrad der zugehörigen Formfunktion. Die Interpolation zwischen den Knoten erfolgt gemäß Bild 6-6 entweder linear oder quadratisch. Gemischt linear-quadratische Elemente werden vergleichsweise selten eingesetzt. Darüber hinaus sind höhere Polynomansätze auf Grund der großen Bandbreite der Steifigkeitsmatrix unüblich.

**Bild 6-6** - Definition verschiedener Elementtypen

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Element handelt es sich um ein *20-Knoten-Serendipity-Element*, welches im Gegensatz zum Lagrange-Element auf die zusätzlichen Mittenknoten auf den Elementflächen und in der Volumenmitte verzichtet. Zusammengefasst wird für die folgenden Simulationen ein quadratisches Quaderelement mit 20 Knoten und reduzierter Integration (Kennzeichen: *C3D20R*) genutzt. Auf Grund der einfachen Geometrie des Zugstabes ist prinzipiell eine grobe Vernetzung von 256 Elementen ausreichend, um diesen vollständig zu beschreiben. Zur Sicherheit wird an dieser Stelle jedoch eine Vernetzung mit 25600 Elementen gewählt.

- **Orientierung**

Dem Materialmodul untergeordnet ist das Orientierungs-Modul, welches der Festlegung der Orientierung richtungsabhängiger Materialmodelle dient. Mit dem globalen Koordinatensystem werden die Geometrie des Körpers sowie wirkende Kräfte und Randbedingungen definiert. Darüber hinaus wird ein weiteres Koordinatensystem definiert, welches den Bauraum der Fertigungsanlage Formiga P 100 gemäß Bild 4-2 a) abbildet und somit die Orientierung der zu simulierenden Bauteile beachtet.

- **Randbedingungen**

Die Randbedingungen innerhalb der FEM-Analyse stellen eine Idealisierung der Lagerung des Bauteils dar. Die mechanische Auswahl der Einspannsituation beeinflusst nachhaltig die Aussagekraft der Analyse. Innerhalb des uniaxialen Zugversuchs wird der Prüfkörper einseitig fest eingespannt, während an der anderen Seite die Zugkraft anliegt.

Die Unterdrückung der Translation in alle Raumrichtungen für die gesamte Querschnittsfläche der Einspannung resultiert in einer Einschnürung zwischen dem ersten und zweiten Element, da keine Querkontraktion an der Querschnittsfläche möglich ist. Zur Vermeidung der daraus entstehenden Spannungsspitzen wird zunächst nur die Translation der Querschnittsfläche in Zugrichtung unterdrückt. Um die verbleibende freie Verschiebung des gesamten Körpers in der Querschnittsebene zu verhindern, gleichzeitig aber die Querkontraktion zuzulassen, wird die Translation der Mittelpunkte der Breitenkanten in x_B -Richtung und analog dazu der Höhenkanten in y_B -Richtung unterdrückt. Somit ist die Einspannung in alle Raumrichtungen unterdrückt ohne die Querkontraktion zu beschränken.

- **Last**

Das Ziel einer jeden Strukturberechnung ist die Ermittlung von Verformungen und Spannungen eines Bauteils unter einer definierten Beanspruchung. Daher müssen neben den Lager- und Kontaktbedingungen Zwangsbedingungen gewählt werden, die die Belastung des Bauteils adäquat repräsentieren. Die Simulationen beruhen auf der Annahme, dass an den Querschnittsflächen des Quaders eine uniforme Spannung herrscht. Das Materialmodell bildet zu diesem Stand lediglich das elastische Verhalten lasergesinterter Bauteile ab. Aus diesem Grund ist der absolute Betrag der auferlegten Gesamtlast zunächst nicht relevant, da der Spannungs-Dehnungs-Verlauf der (linearen) Hook'schen Geraden folgt. Im Zuge der Arbeit wird daher am Ende des Zugstabes eine konstante Spannung aufgetragen, welche einer Gesamtlast von 10 kN entspricht.

6.4.2 Postprozess

Für die Validierung des aufgestellten transversal isotropen Materialmodells zur Abbildung des Festigkeitsverhaltens lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen wurden zunächst die Orientierungen 0° und 90° der in Tabelle 6-2 erfassten Kennwerte simuliert. Es zeigt sich, dass rechnerisch erfasste Werte exakt mit den messtechnisch erfassten Kennwerten übereinstimmen. Dies ist ein grundlegendes Indiz dafür, dass das Modell grundsätzlich korrekt aufgebaut wurde und es keine Fehler im Modellaufbau gibt.

Darüber hinaus wurden in Anlehnung an Kapitel 5.3.1 die mechanischen Eigenschaften der Zugstäbe in den Orientierungen 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° und 90° erfasst. Es ist darauf hinzuweisen, dass die uniaxialen Zugversuche hier im Gegensatz zu der Erfassung der grundlegenden benötigten Kennwerte zum Aufbau des Simulationsmodells aus Gründen der statistischen Absicherung durch die Firma *polymerphys IK GmbH* durchgeführt wurden.

Deren Messergebnisse sind in Bild 6-7 den simulierten Messergebnissen gegenübergestellt. So ist bei einer Orientierung während der Bauteilfertigung von 0° eine Abweichung von lediglich 0,55 % zu beobachten, welche im Verlauf hin zu steigenden Orientierungen leicht ansteigt und ihr Maximum bei einer Bauteilorientierung von 60° von 2,80 % erreicht, bevor diese wieder abflacht. Die vermeintlich größte Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass hier mit die größte Entfernung von den vollbestimmten Hauptrichtungen vorliegt - dennoch kann von einer sehr guten Annäherung gesprochen werden.

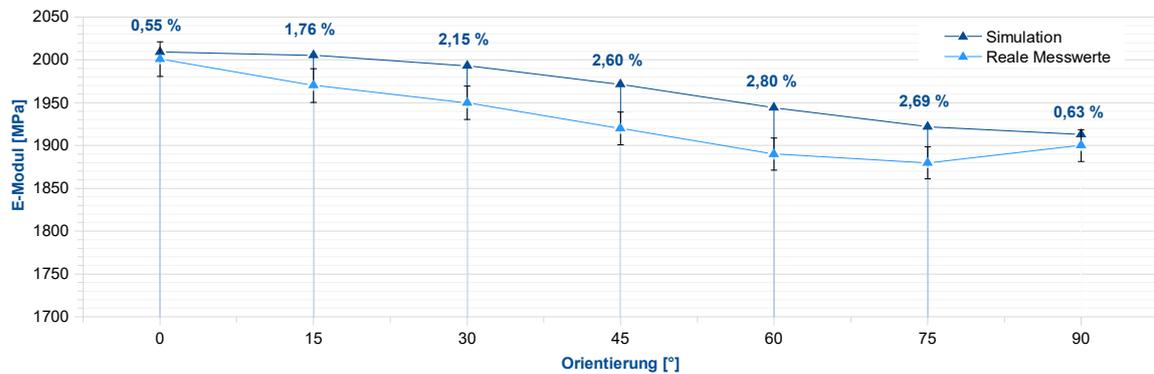


Bild 6-7 - E-Modul aus Hauptsimulation im Vergleich mit real gemessenen Kennwerten

Darüber hinaus werden die Ergebnisse des Kapitels 5.3 für die Validierung herangezogen, in der die Haupteinflussgrößen auf die definierten Zielgrößen, darunter auch die mechanischen Eigenschaften eingegrenzt und verifiziert wurden. Da hier sowohl die Prozesstemperaturen als auch die Prozessparameter zum Energieeintrag variiert wurden, streuen die mechanischen Kennwerte entsprechend stark. Um an dieser Stelle dennoch prüfen zu können, ob sich das Modell prinzipiell auch auf Parametervariationen innerhalb des Laser-Sinterprozesses anwenden lässt, werden die jeweiligen Versuchsreihen durch die Bildung des absoluten Mittelwertes und Vergleich mit den in diesem Kapitel erfassten Kennwerten skaliert und deren Abweichungen zum aufgestellten Simulationsmodell in Bild 6-8 dargestellt.

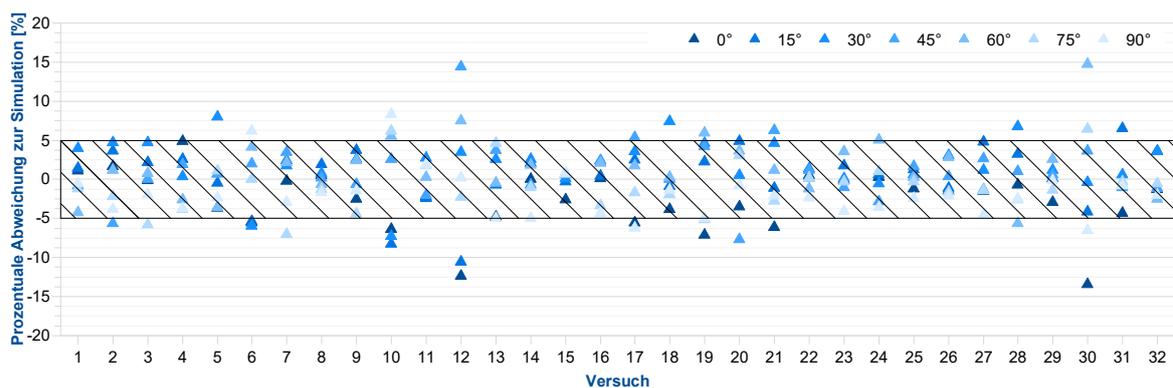


Bild 6-8 - Abweichungen der Messungen des E-Moduls innerhalb der Taguchi Analyse

Damit handelt es sich hierbei um einen rein qualitativen Vergleich und ist entsprechend zu interpretieren. Es zeigt sich, dass etwa 84 % der ermittelten Kennwerte aus der Versuchsreihe nach Taguchi weniger als 5 % von den Simulationsberechnungen abweichen, 63,94 % zeigen sogar eine Abweichung unter 2,5 %. Identifizierte Ausreißer können auf einzelne Versuche zurückgeführt werden, welche mit kritischen Prozessparametern nahe des äußeren ermittelten Prozessfensterbereiches durchgeführt wurden. Zum einen bestätigt sich hier

das aufgestellte Materialmodell und ist in erster Annäherung auf die Fertigung mit alternativen Prozessparametern anwendbar, zum anderen erhöht sich hier die Aussagekraft der in Kapitel 5.3 aufgestellten Analysen.

Innerhalb der Fertigung mit dem Laser-Sinter-Prozess kommt es, wie in jedem anderen Fertigungsverfahren, zu Abweichungen von der Nenngeometrie, vergleiche Bild 6-9 a). Um die Auswirkungen auf die Simulation zu untersuchen, wurde zum Vergleich eine Simulationsreihe mit dem Realquerschnitt aus dem Prüfprotokoll durchgeführt. Die dabei für jeden Rotationswinkel simulierten E-Module werden in Bild 6-9 b) den E-Modulen des Nennquerschnitts gegenübergestellt.

Die reale Querschnittsfläche weicht um bis zu 6,95 % von der Nennquerschnittsfläche ab, wobei die mittlere Abweichung 5,16 % beträgt. Trotz relativ gesehen erkennbaren Abweichungen, hat dies nur relativ geringe Auswirkungen auf den E-Modul. So weicht dieser mit korrigiertem Querschnitt lediglich 0,0002 % von dem simulierten E-Modul ab. Damit können die 3D-CAD-Daten durchaus als Grundlage für die Simulation verwendet werden. Trotz potentieller Geometrieabweichungen innerhalb des Laser-Sinterprozesses sind die Abweichungen so gering, dass sie nicht zwingend in die Simulation integriert werden müssen.

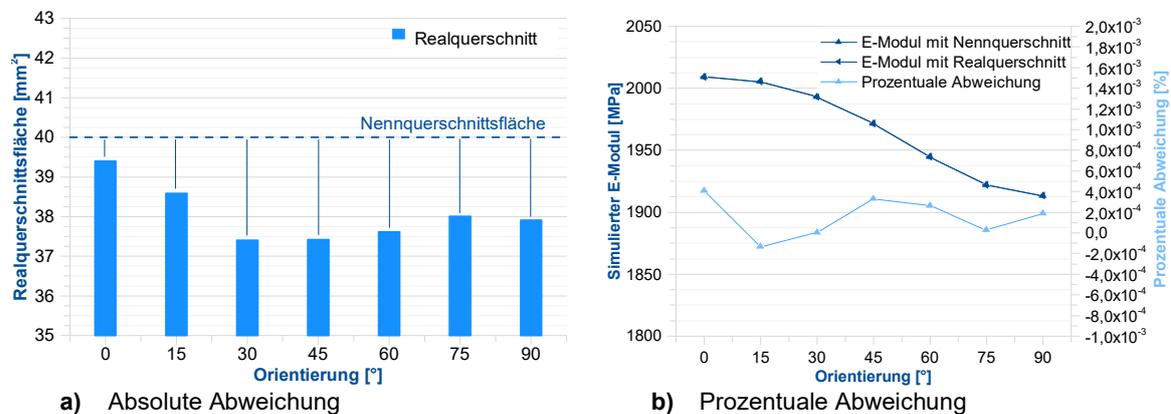


Bild 6-9 - Vergleich Nenn- mit Realquerschnitt

Zur Beurteilung der Qualität des aufgestellten Materialmodells wurde weiter eine Vergleichssimulation auf Basis der Kennwerte des vorhandenen Datenblatts erstellt. Da genauere Materialinformationen hier nicht verfügbar sind, kann das richtungsabhängige Materialverhalten nicht simuliert werden. Es wird ein isotropes Materialmodell zu Grunde gelegt. Wie in Bild 6-10 dargestellt, sind maximale Abweichungen von bis zu 14,04 % zu verzeichnen. Mit Erhöhung des Orientierungswinkels α_{BO} und der damit verbundenen niedrigeren mechanischen Eigenschaften gleichen sich beide Werte an. Die minimale Abweichung beträgt dennoch 7,5 %. Eine weitere Näherung besteht in der Mittelung der Materialkennwerte zweier Zugversuche in den Orientierungen $\alpha = 0^\circ$ sowie $\alpha = 90^\circ$. Das richtungsabhängige Materialverhalten wird demnach als bekannt vorausgesetzt, der Aufwand für die Bestimmung des Schubmoduls ist aber zu groß bzw. genauere Materialinformationen sind nicht verfügbar oder die Implementierung des richtungsabhängigen Materialmodells zu umfangreich. Wie in Bild 6-10 erkennbar, kann das richtungsabhängige Materialverhalten nicht implementiert werden. Durch die Verwendung von gemittelten Materialkennwerten werden die Auswirkungen des richtungsabhängigen Verhaltens jedoch gemindert.

So belaufen sich die maximalen Abweichungen auf 5,43 %. Somit werden in erster Näherung bei relativ gesehen geringem Aufwand gute Werte erzielt, es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass hier lediglich die rein elastische Verformung simuliert wurde, bei der Integration weiterer Module zur Abbildung thermoplastischer Materialeigenschaften wie Plastizität, Viskosität oder Temperaturabhängigkeiten sind größere Abweichungen zu erwarten.

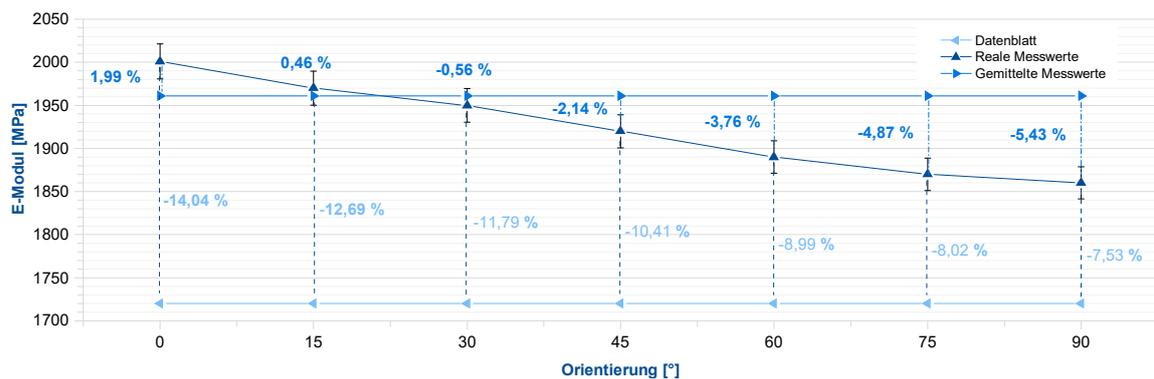
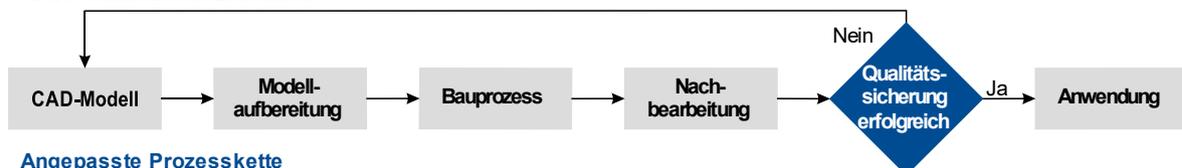


Bild 6-10 - FEM-Simulation auf Basis von Datenblattinformationen und gemittelten Kennwerten

Bei der Betrachtung der in Kapitel 2.3 eingeführten technologischen Prozesskette zur Fertigung lasergesinterter Bauteile sind qualitätssichernde Maßnahmen - unabhängig davon, ob es sich um zerstörende oder zerstörungsfreie Prüfungen handelt - erst nach der direkten Fertigung realisierbar. Als Folge muss die gesamte Prozesskette im Falle von geometrischen Qualitätsmängeln so lange neu durchlaufen werden, bis das Bauteil in der entsprechenden Qualität gefertigt wurde. Die durchgeführten Betrachtungen, namentlich die Erstellung eines Materialmodells innerhalb einer FEM-Umgebung, ermöglichen es gegenüber dem aktuellen Stand der Technik schon vor der Modellaufbereitung iterativ Maßnahmen zu ergreifen, um die geforderten Anforderungen erfüllen zu können, vergleiche Bild 6-11. Aus wirtschaftlicher Sicht sind bei kritischen Bauteilauslegungen große Einsparpotentiale realisierbar. Insbesondere bietet sich weiter die Möglichkeit, durch die Abbildung potentieller Lastzustände des Bauteils und damit der Sicherung mittels FEM eine Vertrauensbasis zu schaffen, welche mittelfristig die Akzeptanz dieser relativ neuen Technologie erhöht.

Konventionelle Prozesskette



Angepasste Prozesskette

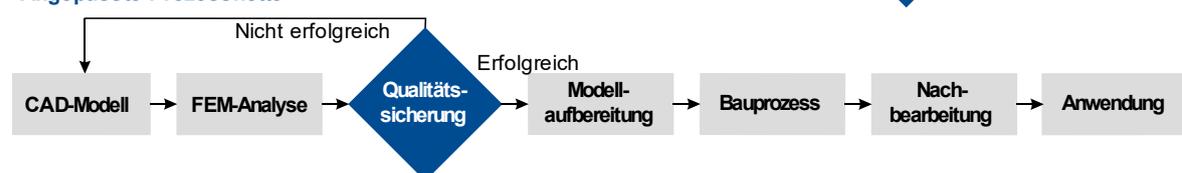


Bild 6-11 - Anpassung der technologischen Prozesskette

7 ALTERNATIVE BELICHTUNGSSTRATEGIEN DURCH SELEKTIVE FLÄCHENBELICHTUNG

Die Ergebnisanalyse des vorangestellten Kapitels 5 belegt, dass die verfahrensspezifischen Wechselwirkungen zwischen Belichtungsparametern und der Oberflächengüte als Qualitätsmerkmal sehr komplex sind, deren Einfluss jedoch auch als herausragend beschrieben werden kann. Es hat sich gezeigt, dass sich die Oberflächengüte gleich orientierter Flächen durch die Wahl der Belichtungsparameter signifikant beeinflussen lässt. Weiter variiert der Einfluss der betrachteten Einstellfaktoren in Abhängigkeit von der betrachteten Flächenorientierung, erkennbar beispielsweise an der auffallend hohen Streuung der zusammengefassten Orientierungen innerhalb der Faktorwirkungsdiagramme in Kapitel 5.3.2. So führen bei unterschiedlichen Flächenorientierungen unterschiedliche Belichtungsparameter zu optimierten Ergebnissen, das heißt, gleiche Belichtungseinstellungen unterschiedlich orientierter Flächen stellen in der Regel lediglich eine Kompromisslösung dar. Die Bauteilorientierung kann daher als signifikanter Einfluss herausgestellt werden, die Ausführungen sowohl im Stand der Technik als auch die Ergebnisse in Kapitel 5.4 bestätigen diese Beobachtung.

Die bisherigen Untersuchungen fokussierten sich zunächst auf die Bauteiloberflächenorientierung $\alpha = 90^\circ$ - es wurde ein optimierter Parametersatz sowohl für die Füll- als auch für die Konturbelichtung gefunden, welcher eine optimierte Oberflächengüte eben jener Orientierung gewährleistet. Aufbauend auf den herausgestellten Erkenntnissen werden die Analysen innerhalb dieses Kapitels auf weitere prägnante Orientierungen ausgeweitet, um im Ergebnis optimierte Parameterfenster für selbige zu finden. Weiter beinhaltet dieses Kapitel einen Ansatz zur Lösung der hier betrachteten Optimierungsaufgabe. Genauer wird innerhalb der Arbeit ein Algorithmus entwickelt und vorgestellt, der es ermöglicht, das Bauteil so zu manipulieren, dass einzelne Bauteilflächen in Abhängigkeit von ihrer Orientierung individuell angesteuert und mit separaten Parametern belichtet werden können.

7.1 Orientierungsabhängigkeit lasergesinteter Bauteile

Analog zur Betrachtung der mechanischen Eigenschaften lasergesinteter Bauteile ist die Oberflächengüte durch ein ausgeprägtes anisotropes Verhalten gekennzeichnet. Zur Quantifizierung wird der Probenkörper *PKG_02* mit dem in Kapitel 5 identifizierten Parametersatz ($P_{\text{Fläche}} = 12 \text{ W}$, $v_{\text{Fläche}} = 4000 \text{ mm/s}$, $\Delta s = 0,24 \text{ mm}$, $P_{\text{Kontur}} = 15 \text{ W}$, $v_{\text{Kontur}} = 2000 \text{ mm/s}$, $D_s = 0,1 \text{ mm}$, $T_{PK} = 141,5 \text{ }^\circ\text{C}$) gefertigt. Die ermittelten Kennwerte werden in Abhängigkeit von der Bauteiloberflächenorientierung in Bild 7-1 dargestellt.

Es zeigt sich ein Oberflächenprofil, welches durch eine hohe Streuung gekennzeichnet ist. So lässt sich ein minimaler Rauheitskennwert in der Orientierung $\alpha = 0^\circ$ von $Rz_{\text{min}} = 83,55 \text{ } \mu\text{m}$ sowie eine maximale Oberflächengüte von $Rz_{\text{max}} = 163,71 \text{ } \mu\text{m}$ in der Orientierung $\alpha = 165^\circ$ identifizieren. Global gesehen weisen nach unten gerichtete Flächen insgesamt niedrigere Oberflächenkennwerte auf als nach oben gerichtete Flächen. Gründe können in den durch den Temperaturgradienten zwischen aufgeschmolzener Fläche und der Atmosphäre im Baurauminnern bedingten Verzugserscheinungen gefunden werden. Die potentiell resultierenden charakteristischen Auswölbungen an den Rändern glätten nach unten

gerichtete Bauteiloberflächen tendenziell, wobei bei Flächen mit einer Orientierung von $\alpha > 90^\circ$ gleicher Effekt diese aufraut. Bauteiloberflächen, welche parallel bzw. senkrecht zur Baufortschrittsrichtung gefertigt werden, erreichen hier beste Kennwerte, sprich minimale Rauheitskennwerte.

Es zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen den Zielgrößen und der Spitzenhöhe, welcher, wie in Kapitel 2.4.1 aufgeführt, den größten Abstand zwischen dem Facetten- und dem Schichtmodell darstellt und somit als Maß für den Treppenstufeneffekt herangezogen wird. Gemäß Definition ist der Treppenstufeneffekt im ebenen Orientierungszustand, also parallel zur Bauebene, sowie in Baufortschrittsrichtung nicht vorhanden, die Spitzenhöhe somit $c_{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ} = 0$. Ausgehend von der Oberflächenorientierung $\alpha = 90^\circ$ nimmt diese hin zu Orientierungen parallel zur Bauebene degressiv zu. Damit zeigen die Spitzenhöhen und die Oberflächenrauheit Rz einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf.

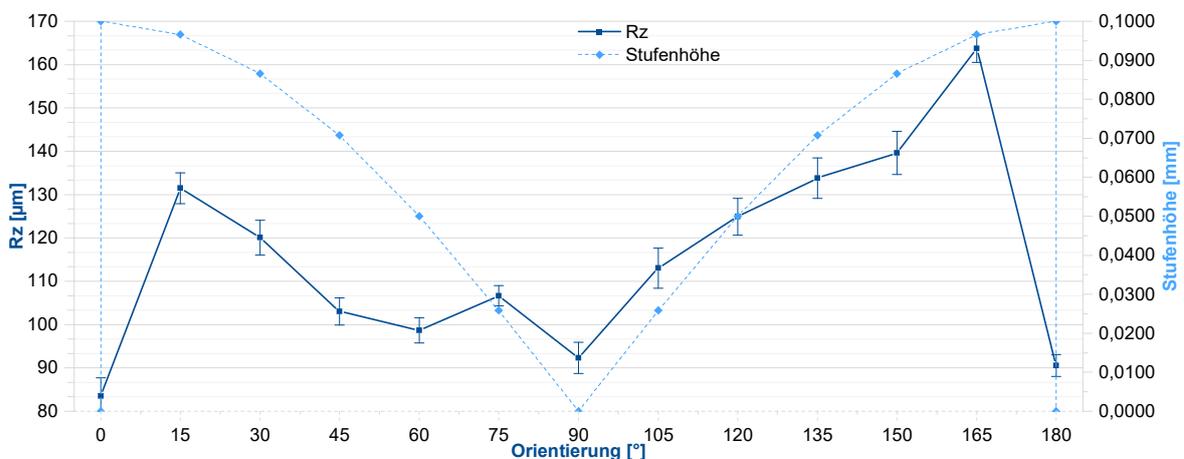


Bild 7-1 - Gemittelte Rautiefe Rz in Abhängigkeit der Orientierung

Der zum Einsatz gekommene Parametersatz der Konturbelichtung beschränkt sich auf die Optimierung der Flächenorientierung $\alpha = 90^\circ$. Im Folgenden soll die gleiche Versuchsmethodik auf weitere Orientierungen ausgeweitet werden. Explizit werden sowohl die nach unten gerichteten Flächen ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) als auch die nach oben gerichteten Flächen ($115^\circ, 130^\circ, 145^\circ, 160^\circ, 175^\circ, 180^\circ$) in Form eines vollfaktoriellen fünfstufigen Versuchsplans analysiert. Variiert werden in 25 Versuchen die Laserleistung P_{Kontur} in den Grenzen $5 \text{ J/s} - 25 \text{ J/s}$ sowie die Lasergeschwindigkeit v_{Kontur} in den Grenzen $1000 \text{ mm/s} - 5000 \text{ mm/s}$.

7.1.1 Nach unten gerichtete Bauteiloberflächen

Der Übersichtlichkeit halber wird die Ergebnisanalyse aufgeteilt in die Betrachtung von nach unten und nach oben gerichteten Bauteiloberflächen. Die Auswertung ersterer Orientierungen ist in Bild 7-2 dargestellt. Hier wird die gemittelte Rautiefe in Abhängigkeit von der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit der Konturbelichtung aufgetragen, mit dem Hinweis, dass die Darstellung des arithmetischen Mittenrauwertes Ra ein grundsätzlich ähnliches Verhalten aufweist. Wie bereits in Abschnitt 7.1 aufgezeigt, weist die Oberflächenorientierung 0° die niedrigste Oberflächenrauheit auf, da der verfahrensbedingte Treppenstufeneffekt nicht zum Tragen kommt. Weiter beeinflussen die konturgebenden Prozessparameter die Oberflächengüte im direkten Vergleich hier relativ wenig. Mit steigenden Flächenorientierungen steigen sowohl Oberflächenrauheiten als auch der Einfluss von Laserleistung und Scangeschwindigkeit der Konturbelichtung zunächst sprunghaft an und flachen dann mit weiteren steigenden Winkeln wieder ab.

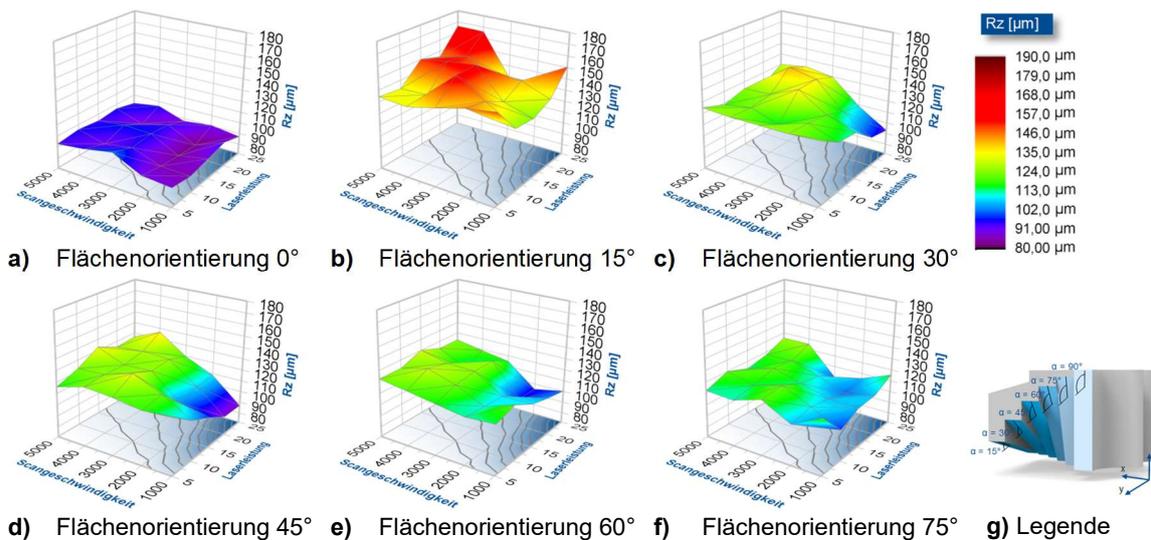


Bild 7-2 - Abhängigkeit der Oberflächenrauheit definierter Bauteilorientierungen (Downskin) über der Scangeschwindigkeit und der Laserleistung der Konturbelichtung

Die Darstellung der gemittelten Rautiefe der Orientierungen über die Streckenenergiegedichte in Bild 7-3 ermöglicht die Identifizierung zulässiger Belichtungsenergiebereiche, in denen sich maximale Oberflächengüten erzielen lassen. Stellt sich für eine Bauteilflächenorientierung parallel zur Bauebene eine Streckenkonturbelichtung von $E_s = 8 \text{ J/cm} \pm 2 \text{ J/cm}$ ein, steigt der Energiedichtebedarf zur Darstellung minimaler Oberflächengüten mit steigenden Orientierungen bis hin zu $\alpha = 45^\circ$ bis auf $E_s = 25 \text{ J/cm}$. Eine weitere Erhöhung der Bauteilorientierung bis $\alpha = 90^\circ$ resultiert in einer Verschiebung hin zu niedrigeren Energiedichten der Konturbelichtung, vergleiche Kapitel 5.4.2. Insgesamt variiert der Energiedichtebedarf zur Gewährleistung einer optimierten Oberflächenrauheit in Abhängigkeit von der Orientierung somit um 80 %.

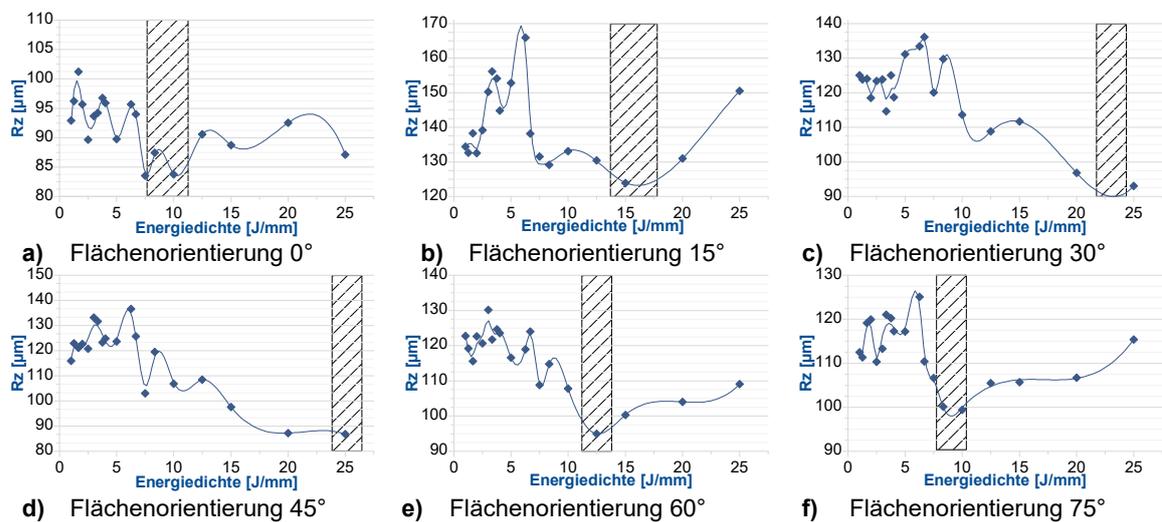


Bild 7-3 - Abhängigkeit der Oberflächenrauheit definierter Bauteilorientierungen (Downskin) über der Streckenenergiegedichte der Konturbelichtung

7.1.2 Nach oben gerichtete Bauteiloberflächen

Bild 7-4 zeigt analog zum vorherigen Kapitel die gemittelte Rautiefe der nach oben gerichteten Orientierungen in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit und der Laserleistung der Konturbelichtung. Auffällig ist zunächst der geringe Einfluss der untersuchten Prozessparameter auf die Oberflächeneigenschaften der Orientierung $\alpha = 180^\circ$. Es stellen sich

gemittelte Rautiefen in den Grenzen $Rz_{180^\circ_min} = 95,16 \mu\text{m}$ und $Rz_{180^\circ_max} = 103,14 \mu\text{m}$ ein. Weiter reagiert die Oberflächengüte mit sinkenden Bauteilorientierungen besonders im unteren Energiedichtebereich sensibel auf die Variation der betrachteten Parameter.

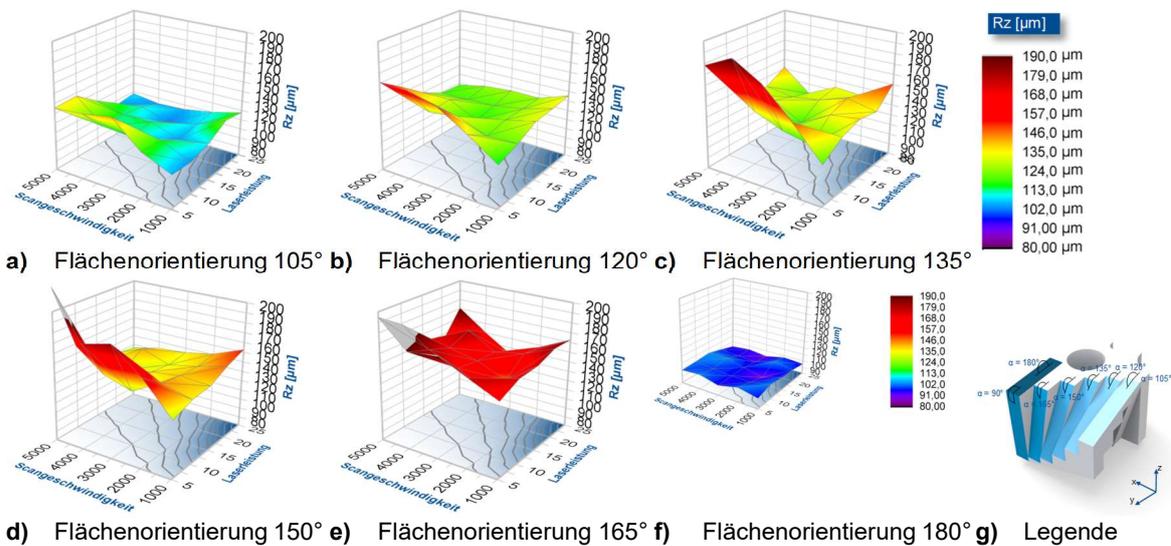


Bild 7-4 - Abhängigkeit der Oberflächenrauheit definierter Bauteilorientierungen (Upskin) über der Scangeschwindigkeit und der Laserleistung der Konturbelichtung

Insgesamt ist der Energiebedarf für Bauteiloberflächen, welche nach oben gerichtet sind, geringer als bei nach unten gerichteten Flächen, siehe Bild 7-5. Gründe können hier in der Tatsache gefunden werden, dass der Temperaturgradient mit erhöhtem Energieeintrag des Lasers zwischen Schmelzfilm und Atmosphäre steigt und damit Verzugerscheinungen prinzipiell stärker ausgeprägt sind. Bauteilkanten wölben sich somit nach oben, im Falle der Bauteilunterseite also an die folgende Schicht. Die Schichten innerhalb der Bauteiloberseite verziehen sich in Richtung des Pulverbetts und wirken dem Bestreben einer guten Oberflächengüte somit entgegen. Weiter schmelzen bei nach unten gerichteten Flächen bei hohem Energieeintrag vermehrt Pulverpartikel der darunter liegenden Schichten auf und wirken somit der Spitzenhöhe entgegen, vergleiche Bild 2-5. Weiter sinkt der Energiebedarf mit steigender Flächenorientierung bis zu $\alpha = 150^\circ$ zur optimalen Darstellung der Bauteiloberflächen und erhöht sich bis zu einer Orientierung von $\alpha = 180^\circ$ wieder. Damit variiert der Energiebedarf in den Grenzen $E_s = 3 \text{ J/cm}$ und $E_s = 10 \text{ J/cm}$ um 70%.

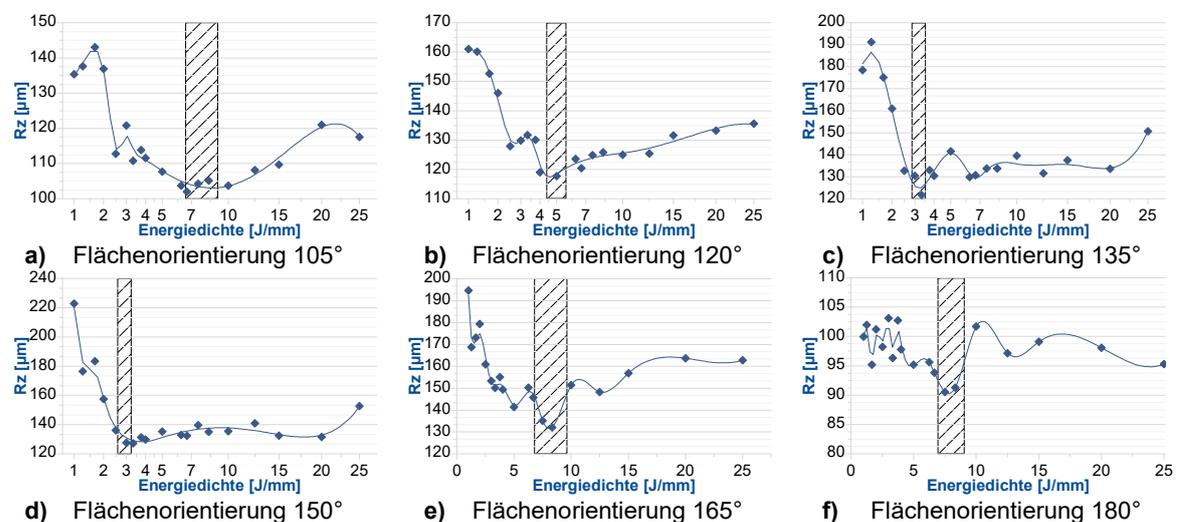


Bild 7-5 - Abhängigkeit der Rauheit definierter Bauteilorientierungen (Upskin) von der Streckenenergie-dichte der Konturbelichtung

7.2 Konzept und Realisierung der selektiven Flächenbelichtung

Die Ergebnisanalyse des vorangestellten Kapitels 7.1 zeigt einen maßgeblichen Einfluss der Bauteilorientierung auf das Qualitätsmerkmal Oberflächengüte lasergesinterter Bauteile. Insgesamt sind die verschiedenen orientierten Bauteiloberflächen durch eine hoch gestreute Oberflächengüte gekennzeichnet. Als minimale Oberflächenrauheit ist die Flächenorientierung 0° mit $R_z = 83,55 \mu\text{m}$ ($R_a = 13,87 \mu\text{m}$) und als maximale Oberflächenrauheit die Flächenorientierung 165° mit $R_z = 163,71 \mu\text{m}$ ($R_a = 25,62 \mu\text{m}$) zu nennen. Sowohl die hohen absoluten Rauheitskennwerte als auch die insgesamt hohe Streuung werden industrieseitig nicht akzeptiert. Anwenderseitig besteht zum einen die Möglichkeit das Bauteil alternativ zu orientieren, um ausgewählte Funktionsflächen optimiert darstellen zu können. Dies setzt allerdings einen hohen Erfahrungsschatz des Bedieners voraus und stellt in Bezug auf Automatisierung und Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität eine zu vermeidende Prozedur dar. Die in der Regel hohe geometrische Bauteilkomplexität erschwert eine manuelle Ausrichtung zusätzlich. Darüber hinaus zeigt sich, dass der Energiebedarf zur optimalen Darstellung lasergesinterter Bauteiloberflächen in Abhängigkeit von der Orientierung variiert. Das Problem wird als solches erkannt - so unterscheiden nutzbare Anlagensoftwares kommerziell verfügbarer Laser-Sinteranlagen bei der Fertigung lasergesinterter Bauteile demnach neben der Flächen- und Konturbelichtung zwischen der Belichtung nach unten orientierter und nach oben orientierter Bauteiloberflächen. So gewählte Parametersätze optimieren allerdings weiter nur präferierte Flächenorientierungen, für andere Orientierungen können alternative Belichtungseinstellungen jedoch geeigneter sein, wie die Ausführungen zeigen.

Gemäß der Zielsetzung wird der Grundgedanke verfügbarer Lösungen, welche die Bauteilbelichtung in nach unten und nach oben orientierter Bauteiloberflächen separiert, aufgegriffen. Explizit wird an dieser Stelle ein Algorithmus vorgestellt, welcher die vorhandene Bauteilgeometrie analysiert, die Flächenelemente in Abhängigkeit der Orientierung separiert und an die Anlagensoftware übergibt, wo diese automatisiert mit optimierten Prozessparametereinstellungen belegt werden.

7.2.1 Architektur

Im Folgenden wird auf die technische Realisierung der Anwendungslösung eingegangen. Genauer wird zunächst das Gesamtkonzept beschrieben. Dessen Programmablauf sowie der direkte Vergleich zur konventionellen Belichtungsstrategie ist in Bild 7-6 dargestellt. Im Anschluss werden die entwickelten Teilkonzepte benannt und detailliert erläutert.

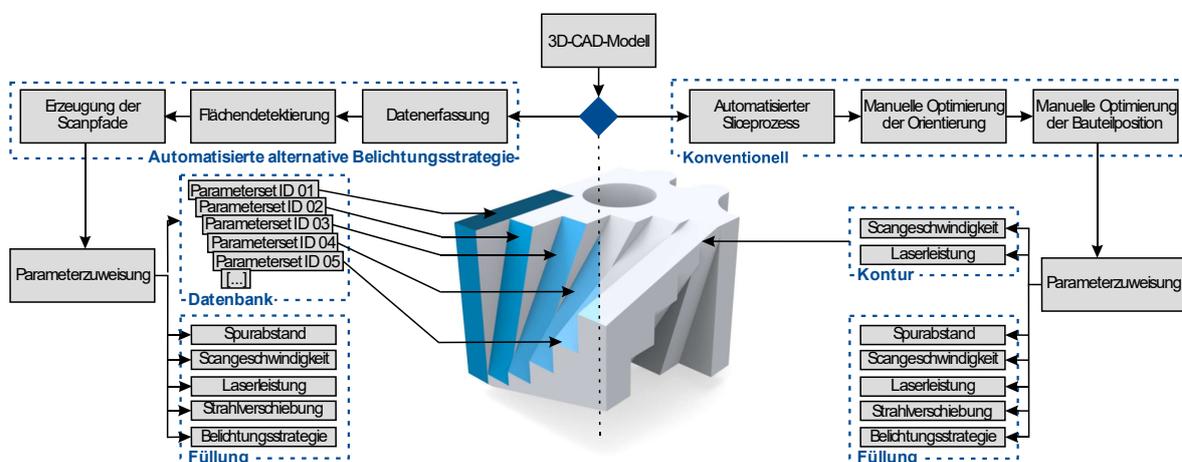


Bild 7-6 - Ablaufdiagramm der selektiven Flächenbelichtung

Die Programmierung des Algorithmus der alternativen Belichtungsstrategie wurde auf Basis von *Access VBA* umgesetzt und setzt sich aus verschiedenen Modulen und Datenbankstrukturen zusammen. Der Algorithmus beginnt mit der Eingabe und Verarbeitung notwendiger Parameter, wie beispielsweise der Angabe der Schichtdicke D_s und der Bereichsintervalle, innerhalb der Datenerfassung. Die Eingabe erfolgt über eine Eingabekonzole. Zur Erfassung der Geometriedaten wird eine im STL-Format abgespeicherte Bauteilrepräsentation eingelesen. Grundvoraussetzung ist, dass diese zum einen fehlerfrei und zum anderen final im Bauraum positioniert und orientiert ist. Um den hier geplanten Lösungsansatz erfolgreich durchführen zu können, müssen alle notwendigen Bauteilinformationen zunächst in eine Datenbank eingelesen und aufbereitet werden. Genauer wird mit Laden der Bauteilgeometrie automatisiert eine einfache Listenstruktur erstellt, in der für jedes eingelesene Dreieck die Koordinaten der zugehörigen Eckpunkte sowie die Richtungskordinaten des Normalenvektors abgelegt werden. Die Listenstruktur stellt die Ausgangsbasis für alle weiteren Berechnungen dar. Darüber hinaus müssen für die Schichtzerlegung alle Dreiecksfacetten hinsichtlich ihrer Lage und Orientierung eingeordnet, sortiert und innerhalb der Listenstruktur gekennzeichnet werden. Der Flächendetektierung sowie der Zuweisung in definierte Orientierungsbereiche folgt die Schichtdatengenerierung durch das sogenannte Clipping, also dem Beschneiden des vorliegenden 3D-CAD-Modells durch Ebenen. So erzeugte Scanpfade werden mit Hilfe eines unabhängigen Datenformates an die Anlagensoftware übertragen und den orientierungsabhängigen Parametern zugewiesen. Sämtliche Untersuchungen innerhalb der Ausarbeitung wurden auf Grundlage des Anlagensystems Formiga P 100 der Firma EOS durchgeführt. Da dem Bediener herstellereitig hier lediglich die Möglichkeit gegeben wird, mit der Anlage über das Softwarepaket PSW zu kommunizieren, soll die Parameterzuweisung auch weiterhin in dieser Umgebung erfolgen.

7.2.2 Datenaufbereitung / Flächendetektierung und -zuweisung

Zunächst soll an dieser Stelle die eingesetzte Methode zur Datenaufbereitung vorgestellt werden, vergleiche Bild 7-7. Ausgangsbasis ist eine durch den Benutzer im Bauraum final orientierte und positionierte beliebige Bauteilgeometrie. Da sich das STL-Datenformat innerhalb der additiven Fertigungstechnik als de facto Standard etabliert hat [1], [57] und eine Substitution beispielsweise durch das AMF-Format eher mittelfristig realisiert werden soll, wird in dieser Arbeit das STL-Datenformat als Grundlage gewählt.

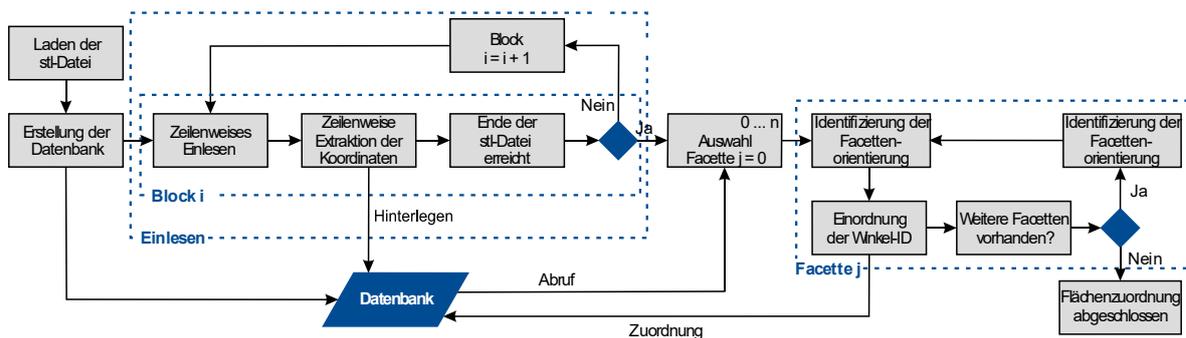


Bild 7-7 - Detektierung und Zuweisung der Bauteilfacetten

- **Einlesen aller relevanter Dreiecksinformationen aus dem STL-Datenformat**

Zur Erfüllung der Zielvorgabe wird die im ASCII-Format vorliegende STL-Datei zeilenweise eingelesen - da das STL-Datenformat gleichmäßig aufgebaut ist, erfolgt das Einlesen Blockweise. Jeder Block beschreibt jeweils eine Dreiecksfacette und wird innerhalb der Programmstruktur immer gleich behandelt. Gemäß Bild 2-4 beschreibt die erste Zeile den Normalenvektor dessen drei Richtungskordinaten $n_x^{(j)}$, $n_y^{(j)}$ und $n_z^{(j)}$ separat in einer Datenbank

hinterlegt werden. Analog dazu werden nach gleichem Prinzip die drei Koordinaten $P_{k,x}^{(j)}$, $P_{k,y}^{(j)}$ und $P_{k,z}^{(j)}$ der Eckpunkte $k = 1 \dots 3$ innerhalb der Zeilen 4 - 6 extrahiert und in der Datenbank gespeichert. Da alle weiteren Zeilen des Blocks keiner weiteren Verwendung bedürfen, werden diese ignoriert. Mit Erreichen der letzten Zeile des Blocks stehen alle notwendigen Informationen der Dreiecksfacette für die weitere Untersuchung zur Verfügung. Sofern das Ende der STL-Datei nicht erreicht ist, arbeitet der Algorithmus diese weiter zeilenweise ab. Mit erfolgreichem Durchlaufen der ersten Prozedur sind alle Dreiecksfacetten der Bauteilgeometrie durch die Beschreibung des Normalenvektors sowie der drei Eckpunkte definiert und innerhalb der Datenbank abgelegt.

▪ Dreiecksanalyse zur Identifizierung der Lage und Orientierung

Die Dreiecksfacetten werden gemäß dem STL-Aufbau zunächst in einer willkürlichen Reihenfolge in die Datenbank eingelesen. Mit dem Ziel, die Bauteiloberflächen mit individuellen Parametersätzen zu belichten, müssen die Dreiecksfacetten in Abhängigkeit von deren Orientierung sortiert und eingeordnet werden. Hierzu werden diese innerhalb der Datenbank anhand der Lage des Normalenvektors und der Dreieckspunkte analysiert und mit einer ID gekennzeichnet, vergleiche Bild 7-8.

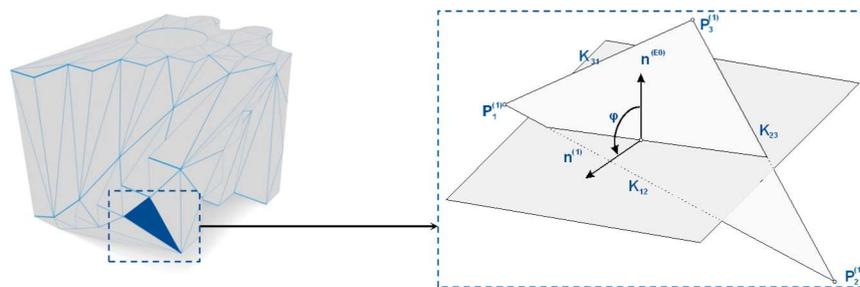


Bild 7-8 - Schnittwinkel zwischen Dreiecksfacette und Bauebene

Die Orientierung der Dreiecksfacetten wird durch die Berechnung des Schnittwinkels zwischen einer fiktiven Ebene E_0 mit dem Normalenvektor $\vec{n}^{(E0)}$, welche die Bauebene repräsentiert, und eben jener Facette E_1 mit dem Normalenvektor $\vec{n}^{(1)}$ realisiert. Da die kartesischen Koordinaten des Normalenvektors zur Verfügung stehen, kann zunächst die Länge des Vektors nach dem Satz von Pythagoras gemäß Formel 7-1 berechnet werden:

$$|\vec{n}^{(j)}| = \sqrt{(n_x)^2 + (n_y)^2 + (n_z)^2} \quad \text{Formel 7-1}$$

Für die Beschreibung des Normalenvektors der Bauebene wird der kanonische Einheitsvektor $\vec{e}^{(E0)} = (0 \ 0 \ 1)$ mit dem Betrag 1 herangezogen. Die mathematische Berechnung des Schnittwinkels φ zwischen der aktuellen Dreiecksfacette und der Bauebene berechnet sich nach Formel 7-2 durch den Arkuskosinus des Skalarproduktes der beiden Normalenvektoren im Verhältnis zum Produkt der zuvor ermittelten Beträge:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{\vec{n}^{(E0)} \cdot \vec{n}^{(j)}}{|\vec{n}^{(E0)}| \cdot |\vec{n}^{(j)}|} \right) \quad \text{Formel 7-2}$$

Im Anschluss wird der errechnete Winkel der jeweiligen Dreiecksfacette innerhalb der Datenbank zugeordnet. Der Vorgang wiederholt sich für jede einzelne Facette der Bauteilgeometrie.

▪ Einteilung der Dreiecksfacetten und deren Zuordnung

Auf Grundlage der zuvor identifizierten Orientierung werden den jeweiligen Dreiecken definierte ID`s zugeordnet. Jede ID repräsentiert einen Prozessparametersatz, welcher sich aus Laserleistung und Scangeschwindigkeit der Konturbelichtung zusammensetzt, mit dem gleich orientierte Flächen innerhalb der Bauphase belichtet werden sollen.

Tabelle 7-1 - Definition der Winkelabhängigen ID`s

ID	Bereich	
01	$\varphi_1 = 0^\circ$	
02	0°	$< \varphi_2 < 22,5^\circ$
03	$22,5^\circ$	$\leq \varphi_3 < 37,5^\circ$
04	$37,5^\circ$	$\leq \varphi_4 < 52,5^\circ$
05	$52,5^\circ$	$\leq \varphi_5 < 67,5^\circ$
06	$67,5^\circ$	$\leq \varphi_6 < 90^\circ$
07	$\varphi_7 = 90^\circ$	
08	90°	$< \varphi_8 < 112,5^\circ$
09	$112,5^\circ$	$\leq \varphi_9 < 127,5^\circ$
10	$127,5^\circ$	$\leq \varphi_{10} < 142,5^\circ$
11	$142,5^\circ$	$\leq \varphi_{11} < 157,5^\circ$
12	$157,5^\circ$	$\leq \varphi_{12} < 180^\circ$
13	$\varphi_{13} = 180^\circ$	

Im Zuge der Untersuchungen wurde zunächst zwischen 13 verschiedenen Oberflächenorientierungen unterschieden, siehe Tabelle 7-1. Hier wurden sowohl nach unten als auch nach oben gerichtete Flächen in jeweils sechs Teilbereiche unterteilt. Zudem sollen Bauteilflächen mit einer Orientierung von 90° in Bezug auf die Bauebene separat belichtet werden. Der Grad der Abstufung kann programmseitig beliebig verkleinert bzw. vergrößert werden. Zu beachten ist, dass eine Minderung der Winkelabstufung mit größeren Datenmengen einhergeht und somit einer höheren Rechenleistung bedarf. Zudem müssen für jede vorgenommene Winkelabstufung entsprechende Belichtungsparametersätze experimentell bestimmt werden. Eine Minderung führt dementsprechend zu einem erhöhten Versuchsaufwand. Mit diesem Schritt ist die Voranalyse der einzelnen Dreiecke abgeschlossen.

7.2.3 Automatisierte Generierung von Scanpfaden

Ein essentieller Schritt zur Umsetzung des angestrebten Algorithmus stellt die Simulation des Schichtzerlegungsprozesses dar, dieser ist in Bild 7-9 dargestellt. Durch die nutzerseitige Angabe der Schichtstärke D_s , sowie dem Vergleich der Z-Komponente eines jeden Dreiecksfacettenpunktes $P_{k,z}^{(i)}$ (mit $i = 1, \dots, n$; n definiert die Anzahl der Dreiecksfacetten) zur Ermittlung der maximalen Bauteilhöhe wird zunächst die Anzahl der Bauteilschichten bestimmt.

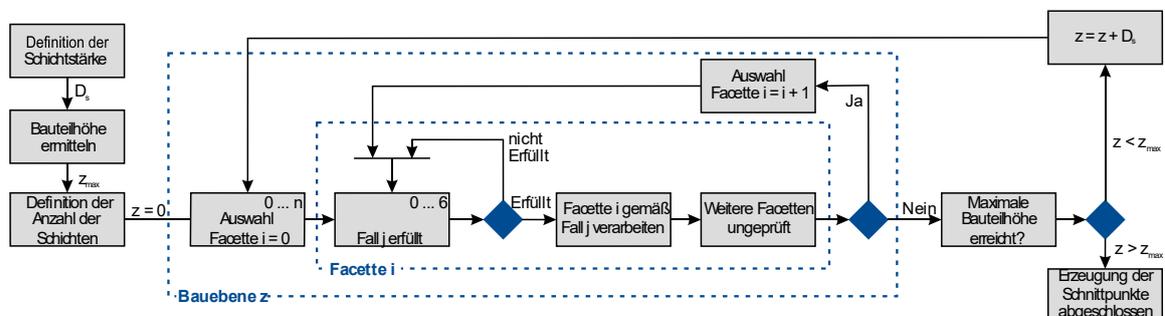


Bild 7-9 - Ermittlung der Scanpfade

Die Erstellung der Scanpfade erfolgt durch das sogenannte *Clipping*, das heißt, die Dreiecksfacetten werden entlang einer in Baufortschrittsrichtung wandernden virtuellen Ebene

geschnitten. Es folgt die Aufbereitung der so ermittelten Scanpfade, indem diese sowohl sortiert als auch redundante Informationen eliminiert werden.

■ Clipping (Ermittlung der Schnittpunkte)

Zur Schichtdatengenerierung werden die Dreiecke iterativ an einer in Baurichtung (z-Achse) wandernden Ebene geschnitten. Dazu wird eine vom Anwender frei wählbare Schichtstärke definiert. Die Generierung der Schnittkonturen erfolgt Schicht für Schicht, beginnend mit der Untersten. Nacheinander wird die Lage aller Facetten sondiert. In Abhängigkeit von deren Lage zueinander wird zwischen insgesamt zehn verschiedenen Fällen unterschieden, vergleiche Bild 7-10.

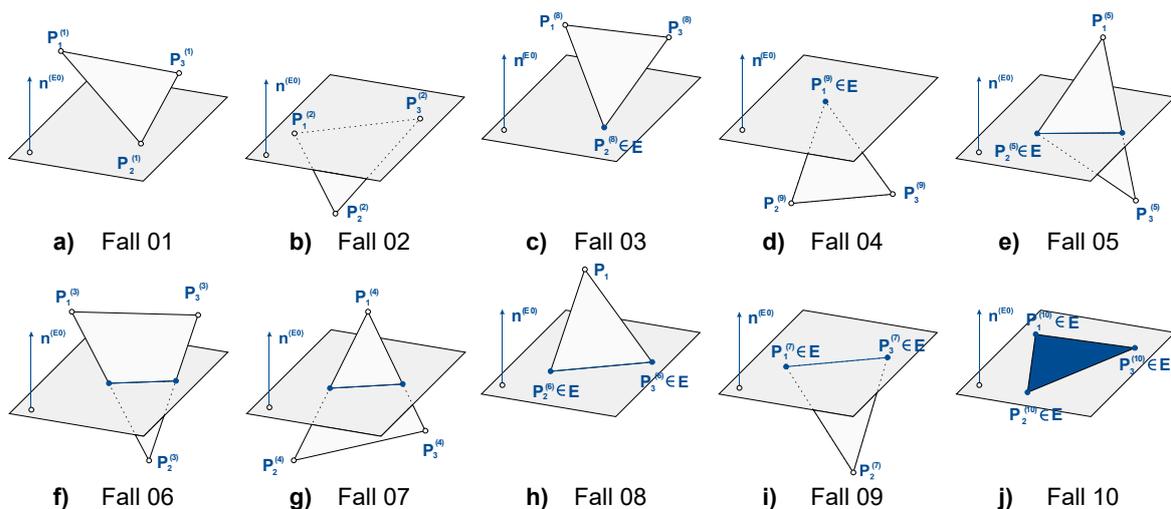


Bild 7-10 - Mögliche Fälle der Ebene-Dreieck-Durchdringung

Zunächst erfolgt die Berechnung des vorzeichenbehafteten Abstandes jedes Eckpunktes zur Ebene. Liegen diese in ihrer Gesamtheit entweder über (*Fall 01*) oder unter (*Fall 02*) der aktuellen Schnittebene, so wird die nächste Dreiecksfacette analysiert. *Fälle 03 - 05* treten in Kraft, sollte genau ein Eckpunkt in der Schnittebene liegen. In ersteren beiden Situationen betrifft die zugehörige Sinterlinie nur den einen Eckpunkt, da beide anderen sich entweder ober- oder unterhalb der Ebene befinden. Bei letzterer Dreieckslage wird die Sinterlinie durch den auf der Schnittebene befindlichen Eckpunkt sowie dem Schnittpunkt eben jener Ebene und der gegenüberliegenden Dreieckskante definiert. Falls sich Eckpunkte sowohl unter als auch über der aktuellen Schnittebene befinden (*Fall 06* und *Fall 07*), werden die zugehörigen Dreieckskanten ermittelt und mit der Ebene geschnitten. Deren Schnittpunkte bilden Anfangs- und Endpunkt der Sinterlinie. Bei der Lage von *Fall 08* und *Fall 09* sind beide auf der Schnittebene befindlichen Punkte, Start- und Endpunkt. Der letzte *Sonderfall 10* liegt schließlich vor, sollten sich alle drei Eckpunkte auf der Ebene befinden. Die Dreiecksfacette liegt somit parallel zur Bauebene und wird direkt entweder als 0° oder 180° Flächenorientierung definiert.

Darüber hinaus wird innerhalb einer weiteren Prozedur unter Ausnutzung der bekannten Lage des Normalenvektors der aktuellen Facette geprüft, ob es sich um eine Außen- oder Innenkontur handelt. Unter Ausnutzung der allgemeinen Konvention des Umlaufsinn polygonaler Flächen - Außenkanten laufen entgegen und Innenkanten mit dem Uhrzeigersinn - werden die Scanpfade und damit auch deren Start- und Endpunkt entsprechend definiert.

■ Konturierung und Sortierung der Schnittpunkte

Da die Dreiecke in einer nicht erkennbaren Zuordnung eingelesen werden, sind auch Start- und Endpunkte der potentiellen Sinterlinien der Außenkontur zunächst in zufälliger Reihenfolge gespeichert. Als Folge wird die Kontur der aktuellen Bauteilschicht nicht als fortlaufende Sinterlinie aufgeschmolzen, sondern durch partielle Aufschmelzung. Aus wirtschaftlicher Sicht ergeben sich somit theoretisch längere Prozesszeiten, da der Laser scheinbar willkürlich von einem Endpunkt zum nächsten Startpunkt springt. Aus prozesseitiger Sicht wiederum werden Start- und Endpunkte einer jeden Sinterlinie prinzipiell zweimal aufgeschmolzen - beides Umstände, welche zu vermeiden sind. Daher werden in einem nächsten Schritt die unsortierten Schnittkurven zu geschlossenen Polygonzügen sortiert.

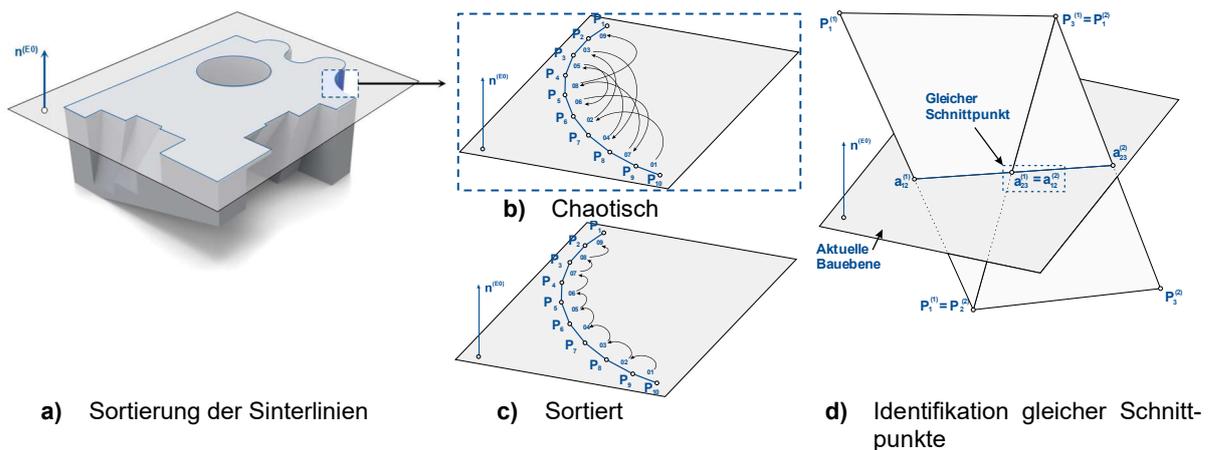


Bild 7-11 - Aufbereiten der generierten Sinterlinien

Der Algorithmus wird mit den Bedingungen gleicher Ebene und Orientierung unter Berücksichtigung der positiven Richtung der Schnittkanten durchgeführt. Beginnend mit einer beliebigen Kante wird die Datenbank nach einem identischen Startpunkt einer weiteren Kante durchsucht. Stimmen Start- und Endpunkt der jeweiligen Sinterlinien überein, wird die Kante angehängt. Mit Beendigung der Prozedur sind alle Kanten einem Polygonzug zugeordnet. Weiter kommt es bei größeren Flächen, welche durch mehrere Dreiecke definiert sind, zu einer Anhäufung gleicher Schnittpunkte. Sollten zu den bereits definierten Bedingungen gleicher Ebene, gleicher ID sowie jeweiligem identischen Start- und Endpunkt zwei (oder mehrere) Kanten in einer Richtung liegen, werden diese vereint und somit redundante Informationen beseitigt. Darüber ist es der Anlagensteuerung nicht mehr möglich eine Strahlverschiebung automatisiert durchzuführen, da die Bauteilkonturierung nunmehr eine Ansammlung von (offenen) Hatchlinien ist, welche lediglich durch ihren Start- und Endpunkt definiert und ohne Bezug zu den vorherigen oder folgenden Schichten isoliert sind. Aus diesem Grund wird im Anschluss an die Aufbereitung der Sinterlinien eine Strahlverschiebung innerhalb des Algorithmus realisiert. Genauer erfolgt die Verschiebung sowohl von Start- als auch Endpunkt der Konturlinie entgegengesetzt zum Normalvektor, wobei der Grad der Verschiebung nach innen durch eine benutzerdefinierte Eingabe erfolgt.

7.2.4 Orientierungsabhängige Parameterzuweisung

Nach der automatisierten Erstellung der Scanpfade müssen die prozessspezifischen Parameter definiert werden. Diese werden standardmäßig innerhalb der anlagenabhängigen Software belegt, im Fall der vorliegenden Arbeit wird das Softwarepaket PSW 3.3 genutzt, um mit der Laser-Sinter-Anlage Formiga P 100 zu kommunizieren. Dennoch besteht der Anspruch an ein flexibles und anlagenneutrales Datenformat, um die Konturdaten systemübergreifend darstellen zu können. In Anlehnung an die Ausführungen innerhalb des Stands

der Technik wird die Datenübergabe mit Hilfe des CLI-Datenformates realisiert. Die Parameterzuweisung erfolgt dabei weiterhin über die Anlagensteuerung, ein entsprechender Teilablaufplan ist in Bild 7-12 dargestellt.

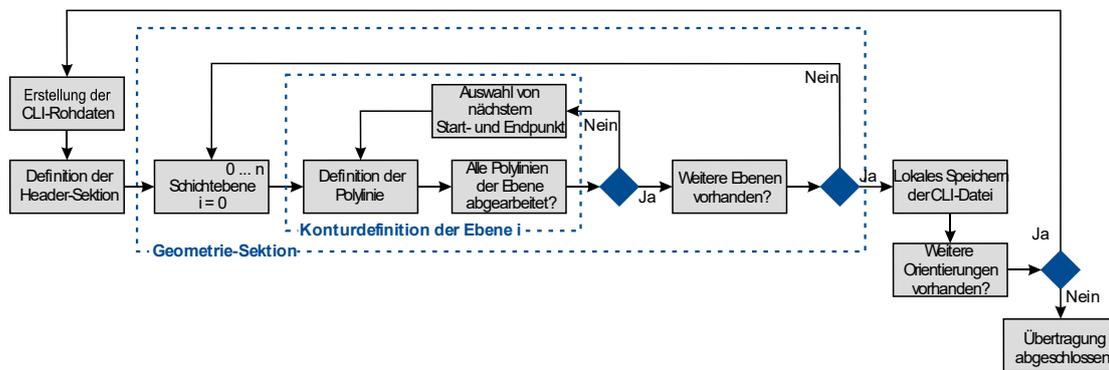


Bild 7-12 - Ablaufprozedur der orientierungsabhängigen Parameterzuweisung

■ Übertragung der Sinterlinien durch ein anlagenneutrales Datenformat

Die programmtechnische Umsetzung der selektiven Flächenbelichtung sieht vor, für jeden Winkelbereich eines Bauteils einen individuellen Prozessparametersatz zu definieren. Prinzipiell ermöglicht die Syntax innerhalb eines CLI-Datenformates die Zuweisung einzelner Polylinien an verschiedenen Modellen. Explizit könnte somit jede Polylinie einer definierten Orientierung zugeordnet werden. Allerdings verhindert die Anlagensoftware der Formiga P 100 ein solches Vorgehen, da die Zusatzdaten nicht interpretiert werden können. Daher wird im Zuge des Algorithmus für jede einzelne Orientierung eine separate CLI-Datei erstellt.

Der generelle Aufbau sowie die einzelnen Bestandteile des CLI-Datenformates wurden bereits in Kapitel 2.4.3 diskutiert und sind in Bild 2-8 dargestellt. Die Datenstruktur ist, ähnlich dem STL-Datenformat, gleichmäßig strukturiert, beginnend mit der ersten Sektion, welche die allgemeinen Prozessinformationen enthält. Weiter werden der Datenbank die notwendigen Informationen der ermittelten Start- und Endpunkte entnommen und in sortierter Reihenfolge und aufsteigender Schichtstärke in Form von Polylinien aufbereitet. Die Erstellung endet mit Erreichen der letzten Bauteilschicht.

■ Vergabe der optimierten Parametersätze

Die Parametervergabe der Anlagensoftware *PSW 3.3* setzt das Vorliegen der Schichtdaten im anlagenspezifischen SLI-Datenformat voraus. Hier bietet die Software *RP-Tools* der Firma EOS die Möglichkeit, die vorliegenden CLI-Daten mit individuellen benutzerspezifischen Einstellungen zu konvertieren. In Abhängigkeit eben jener Einstellungen werden die SLI-Daten entsprechend innerhalb der Anlagensoftware *PSW 3.3* behandelt. Für das vorliegende Problem bedeutet dies, dass eine jede CLI-Datei durch eine für die jeweilige Orientierung definierte Einstellung in das SLI-Datenformat konvertiert wird. Folgend wird diese beim Einladen in die Anlagensoftware *PSW 3.3* automatisch mit dem individuellen Konturbelichtungsparametersatz der Bauteilflächenorientierung belegt.

7.3 Validierung der selektiven Belichtungsstrategie

Die Untersuchungen der vorangestellten Kapitel zeigen, dass die Oberflächengüte lasergesinterter Bauteile im großen Maße von der gewählten Orientierung abhängt. Damit zeigen sich bei der Verarbeitung des Werkstoffs Polypropylen erwartungsgemäß grundsätzlich ähnliche Tendenzen im Vergleich zu bereits qualifizierten Werkstoffen, wie der Stand der

Technik in Kapitel 2.7.2 belegt. So lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Oberflächengüte und der Spitzenhöhe herstellen. Weiter konnte der bereits in Kapitel 5.4.2 für die Flächenorientierung $\alpha = 90^\circ$ identifizierte, signifikante Einfluss der Konturbelichtung auf die Oberflächenbeschaffenheit auch auf weitere Orientierungen in den Grenzen $0 < \alpha < 180^\circ$ herausgestellt werden. Es zeigt sich, dass die Vorgabe eines einzelnen Parametersatzes nicht ausreichend ist, um maximale Oberflächengüten bei der Fertigung laser-gesinteter Bauteile zu erzielen. Vielmehr ist der optimale Energiebedarf der Konturbelichtung zur Gewährleistung einer minimalen Oberflächenrauheit von der Bauteilorientierung abhängig und variiert so von $E_{s_min} = 3 \text{ J/cm}$ bis $E_{s_max} = 25 \text{ J/cm}$.

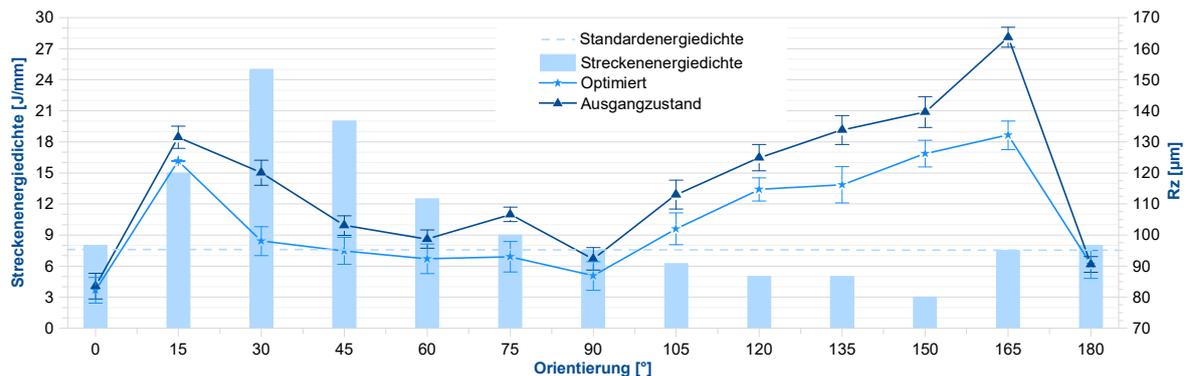


Bild 7-13 - Zusammenfassende Abhängigkeit der Oberflächengüte von der Energiedichte und Bauteilorientierung sowie angepasster Belichtungsstrategie

Die Validierung der alternativen Belichtungsstrategie erfolgt durch die Fertigung des Prüfkörpers PKG_02 mittels konventioneller ($P_{Kontur} = 15 \text{ W}$, $v_{Kontur} = 2000 \text{ mm/s}$) sowie angepasster Parametervergabe. Die Füllbelichtung wird jeweils konstant eingestellt ($P_{Fläche} = 12 \text{ W}$, $v_{Fläche} = 4000 \text{ mm/s}$, $\Delta s = 0,24 \text{ mm}$). Die Bauteilkonturierung wird in insgesamt 13 Bereiche aufgeteilt, deren eingestellte Streckenenergiedichten in Bild 7-13 dargestellt sind. Es zeigt sich, dass die Streckenenergie bei Flächen parallel zur Bauebene sowie in Baufortschrittsrichtung -mit $E_s = 7,8 \text{ J/cm} \pm 0,3 \text{ J/cm}$ nahezu identisch ist, auch konnten hier keine signifikanten Verbesserungen im Vergleich zum bereits aufgestellten Parametersatz erreicht werden. Gründe können in der minimalen Spitzenhöhe, welche als Maß für die Abweichung auf Grund des Treppenstufeneffekts herangezogen wird, gefunden werden. Der Energiebedarf der Konturbelichtung bei nach unten gerichteten Flächen ($\alpha < 90^\circ$) ist tendenziell höher und erreicht sein Maximum von $E_s = 25 \text{ J/cm}$ bei einer Orientierung von $\alpha = 30^\circ$. Die Oberflächenrauheit kann hier um bis zu 22,45 % ($\alpha = 30^\circ$) gesenkt werden. Bei nach oben gerichteten Flächen stellt sich eine Streckenenergiedichte unterhalb der Standardeinstellung als optimal heraus. Die Oberflächengüte lässt sich hier bei einer Flächenorientierung von $\alpha = 165^\circ$ um bis zu 23,91 % verbessern. Der direkte Vergleich aller gemittelten Rauheiten zwischen konventioneller und selektiver Belichtungsstrategie offenbart insgesamt eine Steigerung der Oberflächengüte um 10,97 %. Zeigt erstere Belichtungsstrategie mit einer minimalen gemittelten Rautiefe von $Rz_{0^\circ} = 83,55 \text{ µm}$ sowie einer maximalen gemittelten Rautiefe von $Rz_{165^\circ} = 163,71 \text{ µm}$ eine Streuung von $80,16 \text{ µm}$, konnte letztere mit neu angepasster Strategie um 60,60 % auf $49,91 \text{ µm}$ gesenkt werden.

8 NACHBEARBEITUNG LASERGESINTERTER BAUTEILE

Die Oberfläche lasergesinteter Bauteile zeigt eine Reihe prozessspezifischer Erscheinungen auf, wie den in Kapitel 2.6.2 diskutierten Treppenstufeneffekt, Pulverpartikelanhaftungen, unvollständig gesinterten Pulverpartikel, sowie Orangenhaut- und Schichteffekte - wobei erstere drei Ausprägungen verfahrensbedingt nicht vollständig eliminiert werden können. Die modellgestützte Optimierung innerhalb des Kapitels 5.4.2 zeigt, dass eine optimierte Prozessführung durch die Anpassung der Fertigungsparameter den genannten Effekten entgegenwirkt und die Oberflächenbeschaffenheit prinzipiell verbessert. Auch der Ansatz einer alternativen Belichtungsstrategie, wie sie im Kapitel 7 vorgestellt und qualifiziert wird, liefert hier einen wertvollen Beitrag - analog zu bereits durchgeführten Forschungen und Bemühungen zur Erfüllung der Anforderungen der Bauteilqualität sind aber auch den prozesseitigen Optimierungsstrategien lasergesinteter Teile aus Polypropylen Grenzen gesetzt.

Um den Weg hin zum *Rapid Manufacturing*, der additiven Fertigung von Endprodukten, erfolgreich bestreiten zu können, sind alternative Lösungsansätze zur Gewährleistung der Anforderungsprofile gefragt. Die Folgebearbeitung innerhalb von nachgelagerten Prozessen, also dem *Post Processing*, stellt hier ein potentielles Mittel dar, um die gesetzten Zielvorgaben, wie beispielsweise die Senkung der Rauheit, zu erfüllen. Trotz zahlreicher Ansätze konnte hier bisher kein Durchbruch erlangt werden. Die folgenden Untersuchungen fokussieren sich daher auf die Findung und Qualifizierung geeigneter Folgeverfahren für die Nachbearbeitung lasergesinteter Bauteile aus Polypropylen.

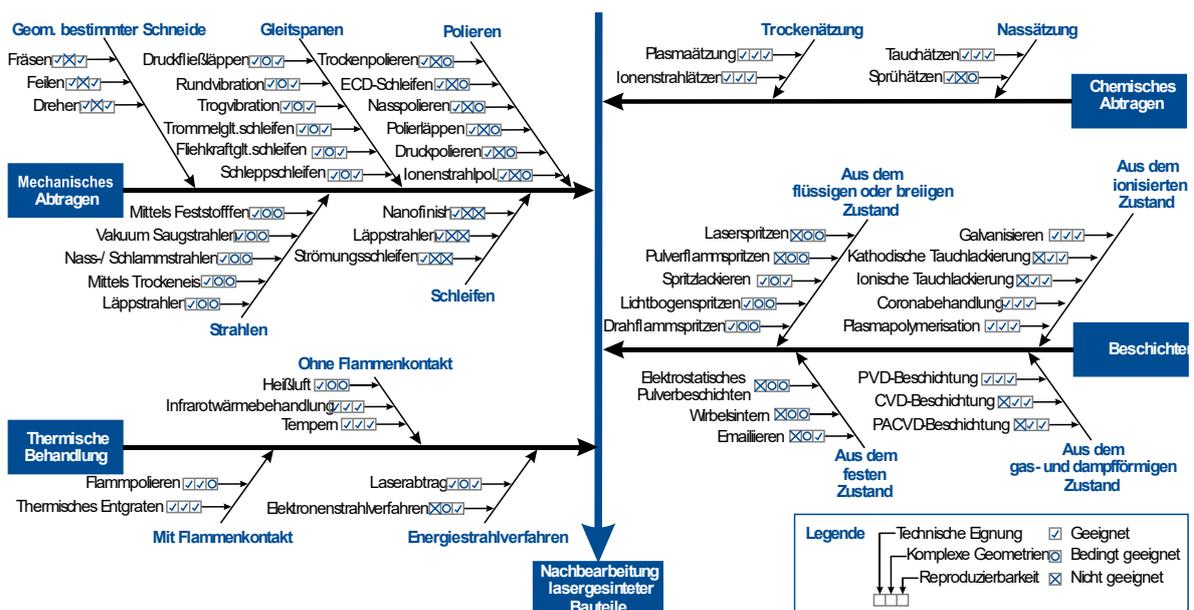


Bild 8-1 - Einteilung potentieller Nachbearbeitungsverfahren für lasergesinterte Bauteile

Nach Bild 8-1 werden die potentiellen Nachbearbeitungsverfahren in die oberflächenbehandelnden Verfahren durch *mechanisches, chemisches oder thermisches Abtragen* sowie in die *Oberflächenbeschichtung aus verschiedenen Ausgangszuständen nach DIN 8580* unterteilt. Weiter werden die aufgeführten Verfahren nach ihrer *technischen* Eignung, der Fähigkeit *komplexe Strukturen bearbeiten* zu können sowie deren Potential der *Reproduzierbarkeit* durch (Teil-)Automatisierung bewertet. Verfahren, welche in mindestens einer der genannten Kategorien als nicht geeignet eingestuft wurden, werden für die folgenden Untersuchungen ausgeschlossen.

8.1 Eingrenzung potentieller Nachbearbeitungsverfahren

Zur weiteren Eingrenzung der aufgeführten Nachbearbeitungsverfahren werden die in Tabelle 4-1 aufgeführten Zielgrößen als Bewertungsgrundlage zu Grunde gelegt. Erfasst werden somit der arithmetische Mittenrauwert R_a als auch die gemittelte Rautiefe R_z der Bauteiloberflächenorientierung $\alpha = 90^\circ$ und weiter die Farbabweichung ΔE sowie die Einhaltung der Form- und Maßhaltigkeit durch die Kantenverrundung a_1 und dem Masseabtrag g . Sofern nicht anders erwähnt, wird für die folgenden Untersuchungen die Prüfkörpergeometrie PKG_02 genutzt.

■ Mechanische Nachbehandlung

Bei der so erfolgten Eingrenzung der Nachbearbeitungsverfahren zeigt sich, dass in der mechanischen Bearbeitung besonders alle dem Gleitspanen sowie Strahlen unterordneten Verfahren ein prinzipielles Potential aufzeigen, lasergesinterter Bauteile mit dem Fokus der Optimierung der Oberflächengüte nachzuarbeiten. Nach DIN 8200 handelt es sich beim Strahlverfahren um ein Fertigungsverfahren, bei dem *Strahlmittel (als Werkzeuge) in Strahlgeräten unterschiedlicher Strahlensysteme beschleunigt werden und zum Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche des Werkstücks gebracht werden* [253]. Der Strahl setzt sich dabei aus dem eigentlichen Strahlmedium sowie dem Transportmedium zum Transport des Strahlmediums zusammen. In Abhängigkeit beider Medien kann zwischen verschiedenen untergeordneten Verfahren unterschieden werden. Die Auswertung eben jener auf dem Markt befindlicher Strahlverfahren ist in Bild 8-2 dargestellt.

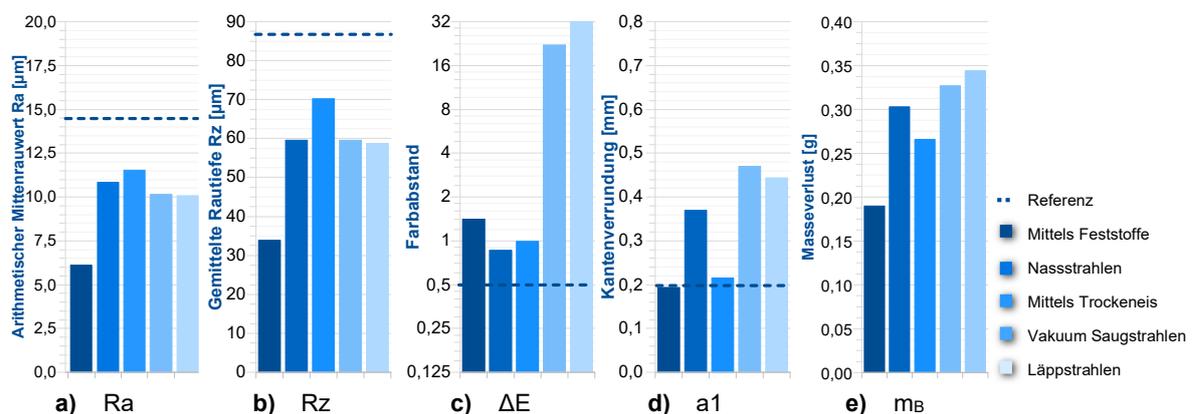


Bild 8-2 - Gegenüberstellung der am Markt befindlichen Strahlverfahren

Allen untersuchten Strahlverfahren ist gemein, dass sie die Oberflächengüte der lasergesinterter Probenkörper zunächst steigern. Das Strahlverfahren mittels Feststoffe (*Strahlmedium: Glasperlen, Durchmesser: 150 - 250 μm , Strahldruck: 3 bar*) erzielt dabei eine Steigerung für R_a um 56,38 % und für R_z um 60,89 %. Die Auswertung des Farbabstandes ΔE

zwischen Referenz- und nachbearbeiteter Probe zeigt, dass die Differenz durch das Vakuum Saugstrahlen und das zweistufige Lappstrahlen so groß ist, dass diese als neue Farbe bewertet wird. Die Farbabweichung der weiteren betrachteten Strahlverfahren ist in Abhängigkeit vom eingesetzten Strahlmittel in der Stufe 2 zu klassifizieren und kann somit für das geübte Auge sichtbar sein. Fertigungsbedingt weisen die lasergesinterten Bauteile im Ausgangszustand bereits einen Kantenzustand auf, welcher als nicht scharfkantig klassifiziert wird. Auf dessen Grundlage kann der Einfluss der Strahlverfahren mittels Feststoffe und Trockeneis als vernachlässigbar gewertet werden. Der Masseverlust als Maß für den Materialabtrag kann mit maximal 2,06 % ebenfalls als vernachlässigbar eingestuft werden. Insgesamt zeigt sich bei der Analyse der betrachteten Strahlverfahren das höchste Potential bei der Nachbearbeitung durch Feststoffe, daher wird dieses innerhalb des Kapitel 8.2 detaillierter untersucht.

Weiter ist das Gleitspanen in der DIN 8589-17 definiert als „Spanen, bei dem zwischen Werkstücken und einer Vielzahl von losen Schleifkörpern bzw. einem Schleifmittel unregelmäßige Relativbewegungen stattfinden, die die Spanabnahme bewirken“ [254] und der Gruppe Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide zuzuordnen [16]. Dem Gleitspanen untergeordnet sind zum einen die Gleitschleifverfahren, d. h. Trommel-, Vibrations-, Fliehkraft- und Tauchgleitschleifen und zum anderen das Gleitlappen, d. h. Trommel-, Vibrations-, Fliehkraft-, Tauchgleitlappen. Betrachtet werden in dieser Arbeit lediglich die Gleitschleifverfahren, welche die Bauteiloberfläche unter der Verwendung von Schleifkörpern, deren Form, Größe und Zusammensetzung abzustimmen sind, mechanisch behandeln. Allen Verfahren ist gemein, dass die unregelmäßige Relativbewegung zwischen Bauteil und Verfahrensmittel die Oberfläche abrasiv bearbeitet und somit zum gewünschten Materialabtrag führt [255]. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 8-3 zusammengefasst. An dieser Stelle wird auf eine weitere Betrachtung des Tauchgleitschleifens verzichtet, mit dem Vermerk, dass dem Tauchgleitschleifen mit Lösen der Einspannproblematik (für lasergesinterte Bauteile mit einer Stückzahl von eins sind hier individuell gestaltete Halterungen nötig) großes Potential zugesprochen wird.

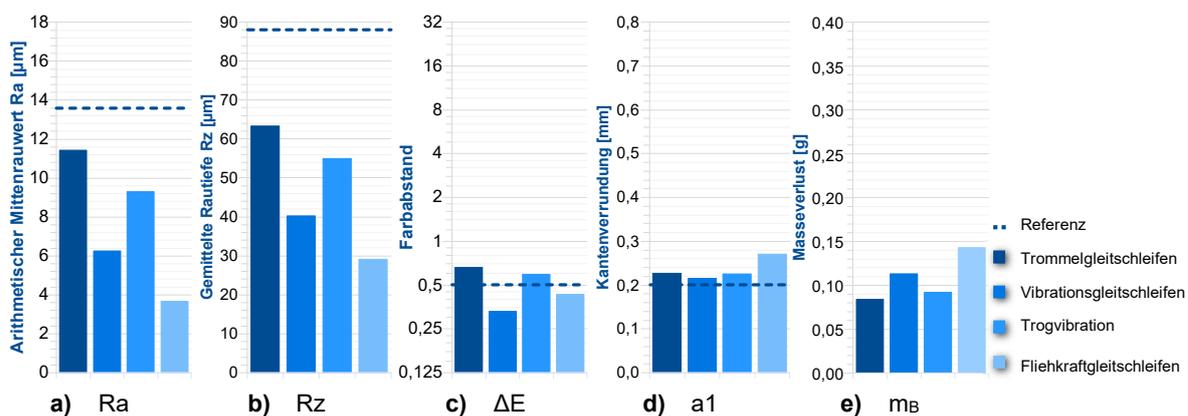


Bild 8-3 - Gegenüberstellung der am Markt befindlichen Gleitspanverfahren

Zunächst ist festzuhalten, dass alle betrachteten Verfahren zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität beitragen. Bei der Betrachtung von der mittleren Rautiefe, bzw. den arithmetischen Mittenrauwert der Messstellen, ist zu erkennen, dass das Fliehkraftgleitschleifen zu den insgesamt besten Ergebnissen führt. Genauer sind hier Steigerungen der Oberflächengüte von 73,81 % auf $R_a = 3,67 \mu\text{m}$, respektive um 66,91 % auf $R_z = 29,19 \mu\text{m}$ zu verzeichnen. Bei der Betrachtung der Rauheiten aller Orientierungen ist eine Minimierung des Streubereichs zwischen minimal und maximal gemessenen Messwerten zu beobachten. Die höchste Farbabweichung im Vergleich zum Ausgangszustand weisen Bauteile auf, welche mittels Trommelgleitschleifen oder Trogvibration nachbearbeitet werden.

Die hier gemessenen Farbabweichungen von $\Delta E = 0,66$ bzw. $\Delta E = 0,59$ bewegen sich innerhalb des zweiten Bereichs, das heißt Unterschiede können für das geübte Auge bemerkbar sein. Die Farbabweichungen des Vibrations- und Fliehkraftgleitschleifens liegen unter $\Delta E = 0,5$ und sind somit nicht erkennbar. Letzteres zeigt bei der Analyse der Kantenverrundung eine Steigerung von ca. 29,25 % im Vergleich zum Ausgangszustand. Die weiteren Nachbearbeitungsverfahren zeigen hier keine signifikante Steigerung. Der Masseverlust ist bei allen betrachteten Verfahren zu vernachlässigen, da er sich in den Grenzen 0,08 % bis 0,14 % bewegt. Insgesamt decken sich die Ergebnisse mit den Herstellerangaben, nach denen Fliehkraftanlagen sich durch eine extrem hohe Bearbeitungsintensität auszeichnen und im Vergleich zu Gleitschleifvibratoren die Schleifleistung der Fliehkraftanlagen um das 10-fache höher ist [256]. Im weiteren Verlauf wird neben dem Strahlen mittels Feststoffen daher auch das Fliehkraftgleitschleifen weiter fokussiert, vergleiche Kapitel 8.3.

■ Thermische Nachbehandlung

Auf Grund des relativ niedrigen Schmelzpunktes des Werkstoffs Polypropylen eignen sich die thermischen Verfahren vermeintlich gut, um die Oberflächengüte lasergesinteter Bauteile zu erhöhen. Durch die Temperatureinwirkung auf das Material soll die Oberfläche hier an- bzw. aufgeschmolzen und geglättet werden. Gemäß Bild 8-1 wird die thermische Nachbehandlung in die Verfahren mit und ohne Flammkontakt sowie die Energiestrahilverfahren eingeteilt, deren Gegenüberstellung in Bild 8-4 dargestellt ist.

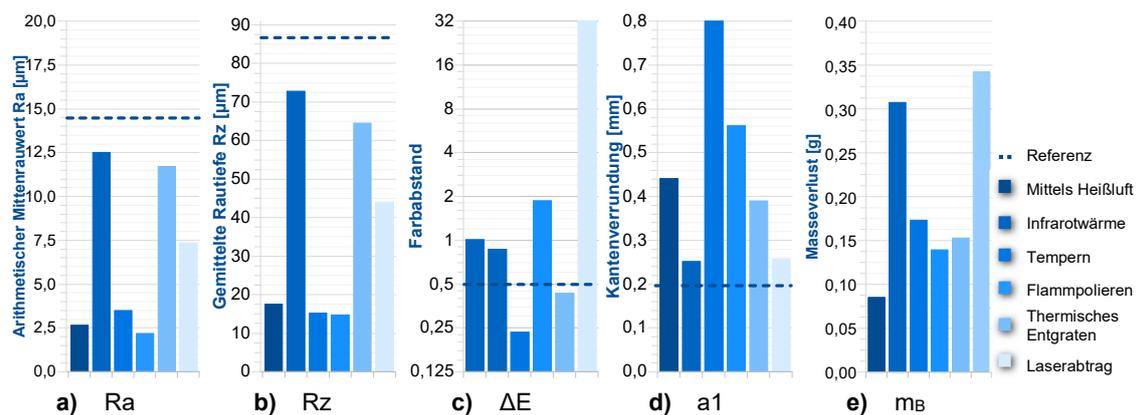


Bild 8-4 - Gegenüberstellung der thermisch behandelnden Nachbearbeitungsverfahren

Es zeigt sich, dass jene Verfahren, welche eine Optimierung der Oberflächengüte hervorruhen, gleichzeitig entweder durch einen hohen Farbanstand ΔE oder aber durch eine inakzeptable Kantenabrundung gekennzeichnet sind. Hervorzuheben ist hier besonders die Bearbeitung ohne Flammkontakt durch Heißluft aber auch das Tempern, mit denen Verbesserungen der gemittelten Rautiefe von bis zu 82,98 % auf $Rz = 14,78 \mu\text{m}$ zu beobachten sind. Der direkte Flammkontakt durch das Flamppolieren resultiert in ähnlichen Optimierungen der Oberflächengüte. Jedoch ist diese nach der Bearbeitung durch lokale Verfärbungen gekennzeichnet. Das thermische Entgraten hingegen zeigt keine signifikanten Änderungen. Allen Verfahren ist darüber hinaus gemein, dass die Masse nahezu unverändert bleibt, da kein Material abgetragen wird. Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Analysen, dass eine thermische Nachbearbeitung begründet durch die meist ungleichmäßige Wärmebringung und die daraus resultierende inakzeptablen Form- und Maßabweichungen nicht geeignet ist, um die Oberflächengüte lasergesinteter Bauteile zu optimieren.

■ Chemische Nachbehandlung

Die in Bild 8-1 dargestellte Trockenätzung lässt sich prinzipiell in das physikalische (*Gasphasenätzen* und *Plasmaätzen* etc.), chemische (*Reaktives Ionenätzen*, *Ionenstrahlätzen*, *Sputtern* etc.) sowie das chemisch-physikalische (*Elektronenstrahl-* und *Laserätzen* etc.) Trockenätzen unterteilen. Typischerweise erfolgt der Abtrag im Gegensatz zum Nassätzen durch den Beschuss von Ionen. Genauer wurden die beiden Verfahren Plasmaätzen und Ionenstrahlätzen untersucht, um eine generelle Bewertung zur Nachbearbeitung lasergesinteter Bauteile zu realisieren. Es zeigt sich, dass durch das Plasmaätzen nachbearbeitete Probenkörper lediglich eine Änderung der Oberflächengüte um 14,99 % erfahren, die Kantenverrundung sich als Maß für die Formhaltigkeit jedoch fast verdreifacht. Das Ionenstrahlätzen hingegen zeigt lediglich eine Verbesserung von Rz um 3,51 %. Darüber hinaus wurde eine erkennbare Farbänderung erfasst. Prinzipiell werden daher die dem Trockenätzen untergeordneten Verfahren als nicht geeignet zur Nachbearbeitung lasergesinteter Bauteile eingestuft. Dem chemischen Ätzen innerhalb der Nassätzverfahren wird an dieser Stelle zunächst ein hohes Potential zugesprochen, da Bauteiloberflächen durch den Tauchvorgang in ein Bad unabhängig von ihrer Komplexität angegriffen und bearbeitet werden können. Allerdings ist dessen Wirkung maßgeblich vom eingesetzten Wirkmedium abhängig. Daher werden hier weiterführende Untersuchungen in Kapitel 8.4 durchgeführt.

■ Oberflächenbeschichtung

Das Beschichten ist nach DIN 8580 definiert als das „*Fertigen durch Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosen Stoff auf einem Werkstück; maßgebend ist der unmittelbar vor dem Beschichten herrschende Zustand des Beschichtungsstoffes*“ [16]. Damit erfolgt die Strukturierung im Gegensatz zu den bisher betrachteten Verfahren additiv. Die Gliederung erfolgt nach dem Aggregatzustand des Beschichtungsstoffes. Prinzipiell kommen hier metallische, anorganisch-nichtmetallische sowie organische Werkstoffe zum Einsatz. Damit verlagert sich das Anforderungsprofil an die beschichtenden Werkstücke meist von der expliziten Senkung der Oberflächenrauheit hin zu dekorativen Anforderungen wie der Farbgebung, dem Deckungsvermögen oder der Einebnung. Darüber hinaus existieren hier maßgeblich funktionelle Anforderungen - auch in Kombination untereinander. Somit erfüllt die Oberflächenbeschichtung in erster Instanz nicht die definierten Ziele der vorliegenden Arbeit - die Optimierung der Oberflächengüte durch Senkung der Rauheitskennwerte bei simultaner Beibehaltung der weiteren geometrischen und mechanischen Produktspezifikationen. Dennoch sollen die nach Bild 8-1 gefilterten Verfahren der Vollständigkeit halber an dieser Stelle untersucht werden, deren Ergebnisanalyse ist in Bild 8-5 zusammengefasst.

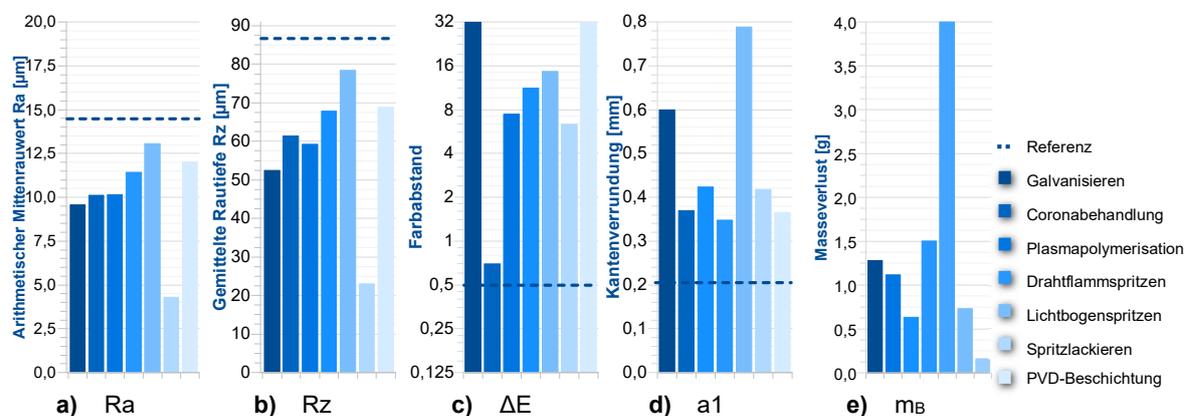


Bild 8-5 - Gegenüberstellung der beschichtenden Nachbearbeitungsverfahren

Bei der Bewertung der Oberflächenrauheit zeigt sich, dass die oberflächenbeschichtenden Verfahren diese prinzipiell minimieren - hervorzuheben sind hier zum einen das Galvanisieren und zum anderen das Spritzlackieren. Gleichzeitig sind die nachbehandelten Bauteile allerdings durch eine (gewollte) Farbänderung gekennzeichnet - im Falle des Spritzlackierens kann die Wahl der Lackfarbe den Effekt teilweise kompensieren. Durch die Beschichtung ist darüber hinaus eine Erhöhung sowohl der Kantenverrundung um mindestens 85,01 % (*PCD-Beschichtung*) bis hin zu 294,25 % (*Lichtbogenspritzen*) als auch eine Massezunahme unvermeidlich. Die Ergebnisse bestätigen damit, dass die (untersuchten) Oberflächenbeschichtungsverfahren die in dieser Arbeit definierten Anforderungen an die Nachbearbeitung lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen nicht erfüllen.

8.2 Mechanische Nachbearbeitung durch das Strahlen mit Feststoffen

Das Prinzip des Strahlens mit Feststoffen wird bereits erfolgreich zur Feinstreinigung sowohl von lasergesinterter als auch strahlgeschmolzenen Bauteilen eingesetzt, vergleiche Kapitel 2.6.1. Durch den Aufprall der eingesetzten Strahlmittel auf die zu bearbeitende Oberfläche wird diese von Pulveranhaftungen gemäß Bild 8-6 a) befreit. Dabei ist der Prozess durch eine Reihe von Einflussgrößen geprägt, in deren Abhängigkeit der Grad der Reinigung oder auch Glättung der Bauteiloberfläche bestimmt wird, vergleiche Bild 8-6 b). Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Strahlversuche erfolgten auf einer Injektorstrahlkabine S90 I der *Firma Klein GmbH+Co* [257]. Der Übersichtlichkeit halber sind in den folgenden Auswertungen lediglich die Oberflächen der prägnanten Orientierungen $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = 135^\circ$ und $\alpha_3 = 180^\circ$ dargestellt.

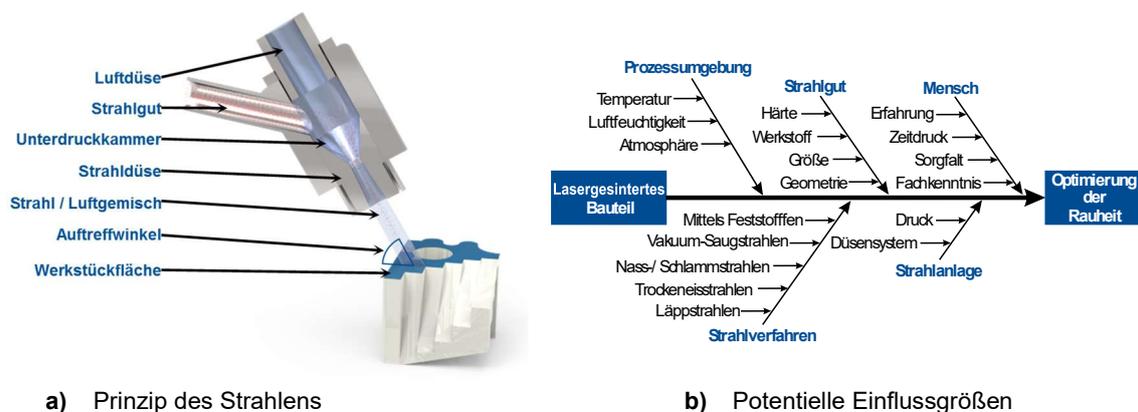


Bild 8-6 - Verfahrensanalyse Strahlen

Gegenübergestellt werden zunächst die Verfahrensmittel Edelkorund (*F-24, F-90, F150, F220*), Keramikperlen ($70 \mu\text{m} - 125 \mu\text{m}$), Glaskorn ($100 - 200 \mu\text{m}$, $300 - 600 \mu\text{m}$, $300 - 800 \mu\text{m}$), Glasperlen ($40 - 70 \mu\text{m}$, $90 - 150 \mu\text{m}$, $150 - 250 \mu\text{m}$) sowie Siliziumkarbid (*F-60, F-36*). Die Ergebnisauswertung zeigt, dass das Strahlmittel Glaskorn mit der Korngröße $300 - 600 \mu\text{m}$ insgesamt das beste Ergebnis mit einem Wert von $R_a = 5,46 \mu\text{m}$ und $R_z = 34,09 \mu\text{m}$ erzielt, vergleiche Bild 8-7 a). Die Werte für das Strahlmittel Siliziumkarbid liegen nur leicht dahinter, das Strahlmittel Siliziumkarbid *F-36* liefert sogar das sehr gute Ergebnis von $R_a = 5,67 \mu\text{m}$ und $R_z = 36,71 \mu\text{m}$. Da Siliziumkarbid auf Grund seiner dunklen Färbung zum einen auf die hellen Probenkörper aus Polypropylen im Zuge des Strahlprozesses abfärbt und zum anderen durch einen hohen Abtrag bei der Nachbearbeitung gekennzeichnet ist, wurden die weiteren Untersuchung mit dem Verfahrensmittel Glaskorn durchgeführt. Bei der Betrachtung der Bestrahlungsdauer zeigt sich, dass bereits nach den ersten 5 Sekunden der Bestrahlung sich die Oberflächenrauheit R_z gemittelt über alle vermessenen Flächen um 60 % reduziert. Bis zum Zeitpunkt von 30 Sekunden sinkt die Rauheit weiter ab

und zeigt ein sehr homogenes Bild der Oberflächenrauheit, vergleiche Bild 8-7 b). Gleichzeitig nimmt der Masseabtrag degressiv in Abhängigkeit mit der Bearbeitungsdauer zu. Daher wurde diese Bestrahlungsdauer für die folgenden Hauptversuche ausgewählt.

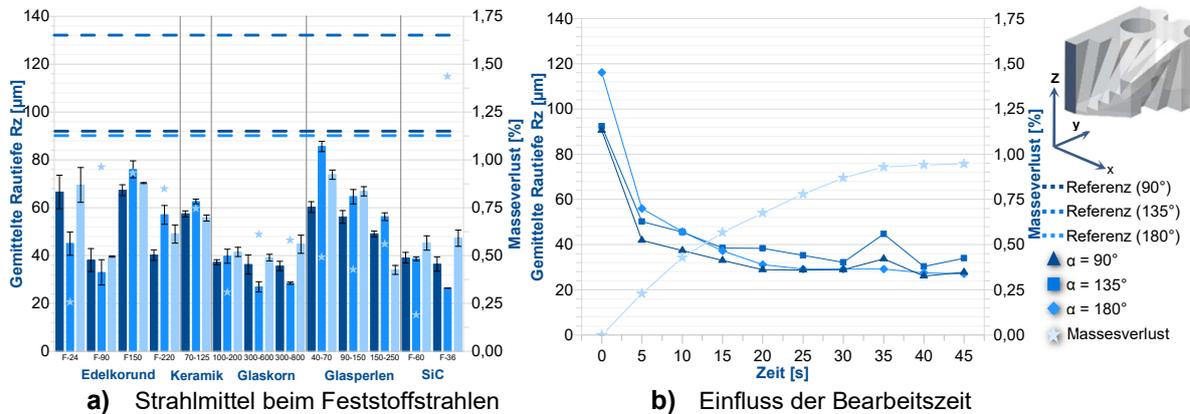


Bild 8-7 - Einfluss verschiedener Strahlmittel und variierender Bearbeitungszeit innerhalb des Feststoffstrahlens

Mit den Erkenntnissen der Vorversuche werden weitere kritische Einflussgrößen durch Methoden der statistischen Versuchsplanung nach Taguchi - Versuchsplan L_9 - untersucht und nach Kapitel 4.4 analysiert. Als zu untersuchende Größen werden die Korngröße des Strahlmittels Glaskorn (80 - 150 μm , 200 - 300 μm , 300 - 600 μm), der Strahlabstand (5 cm, 10 cm, 15 cm) sowie der Bearbeitungsdruck (3 bar, 5 bar, 7 bar) definiert. Gemäß Bild 8-8 zeigt sich, dass innerhalb der Nachbearbeitung durch das Strahlverfahren die Parametereinstellungen des Versuchs 4 (Strahlmittelgröße: 200 - 300 μm , Strahlmitteldruck: 5 bar, Düsenabstand: 5 cm) zu den besten Ergebnissen führen. Explizit verbessert sich die Oberflächengüte der Flächenorientierung 90° um bis zu 67 % auf $Rz_{90} = 30,06 \mu\text{m}$, bei 135° um 76 % auf $Rz_{135} = 27,51 \mu\text{m}$ und bei 180° um bis zu 61 % auf $Rz_{180} = 30,73 \mu\text{m}$. Zudem verringert sich hier im Vergleich die Streuung der Oberflächengüte in Abhängigkeit von der Flächenorientierung empfindlich, das heißt, die Oberflächengüte ist insgesamt gleichmäßiger. Bestätigt wird diese Beobachtung durch die Auswertung mit Hilfe der Wirkungsanalyse, vergleiche Bild 8-8 b). Demnach wird die Oberflächengüte primär durch den Strahlmitteldruck beeinflusst, ein höherer Druck führt erwartungsgemäß zu einer intensiveren Bearbeitung. Gleiches Bild ergibt sich bei der Betrachtung des Strahlmittelabstands. Eine Verringerung des Abstandes führt zu einer intensiveren Bearbeitung, die Oberflächentopografie steigt gleichermaßen mit dem Materialabtrag an. Hingegen ergibt sich bei der Wahl der kleinsten und der mittleren Verfahrensmittelgröße keine eklatante Änderung der Oberflächengüte. Die Wahl kleinerer Korngrößen beeinflusst lediglich den Abtrag negativ. Geschilderte Beobachtungen wurden in einem weiteren Schritt durch die Varianzanalyse verifiziert. Demnach kann der Betriebsdruck unabhängig von der betrachteten Bauteiloberflächenorientierung als höchst signifikant eingestuft werden. Darüber hinaus ist die Varianzanalyse durch einen auffällig hohen Fehleranteil geprägt.

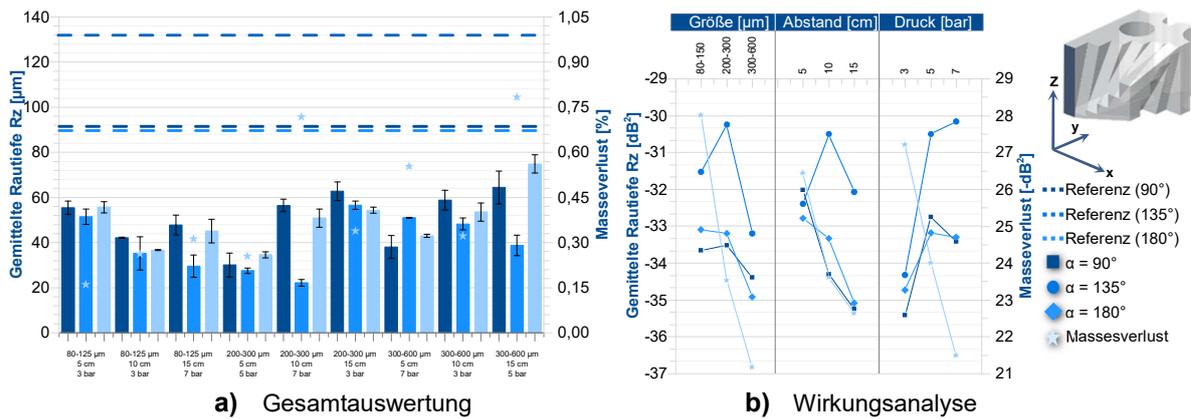


Bild 8-8 - Auswertung der Strahlversuche

Zusammenfassend wurden die Haupteinflussgrößen des Strahlprozesses erfolgreich identifiziert und deren Wirkung bei der Nachbearbeitung lasergesinteter Bauteiloberflächen herausgestellt. Es zeigt sich, dass das Strahlverfahren über die reine Reinigung der Oberfläche von Pulverpartikelanhaftungen hinaus als Nachbearbeitungsverfahren zur Optimierung definierter Zielgrößen wie etwa der Minimierung der gemittelten Rauhtiefe eingesetzt werden kann. Der hohe Fehleranteil innerhalb der Varianzanalyse wiederum lässt darauf schließen, dass es einen systematischen Fehler gibt, der bei der Konzipierung des Versuchs nicht berücksichtigt wurde. So kann der Faktor Mensch, also die individuelle Art und Weise der Nachbearbeitung nicht vollständig eliminiert werden, so dass die Bauteiloberflächen durch fehlende Automatismen unterschiedlich nachbearbeitet werden. Neben der nur bedingt gewährleisteten Reproduzierbarkeit sind innenliegende komplexe Bauteilstrukturen nur bedingt erreichbar.

8.3 Mechanische Nachbearbeitung durch das Fliehkraftgleitschleifen

Die in dieser Arbeit verwendete Fliehkraftgleitschleifanlage der Firma *Otec Präzisionsfinish* vom Typ *CF-18* arbeitet nach dem in Bild 8-9 a) beschriebenen Prinzip. Hierbei werden sowohl Werkstücke als auch Schleifkörper in einem rotierenden Behälter durch Fliehkraft in eine Umwälzbewegung und damit in eine Relativbewegung zueinander versetzt [254]. Dabei unterliegt die Bearbeitung verschiedensten Einflussgrößen, welche in Bild 8-9 b) in maschinenseitige, bauteilseitige und verfahrensseitige Einflussgrößen zusammengefasst sind.

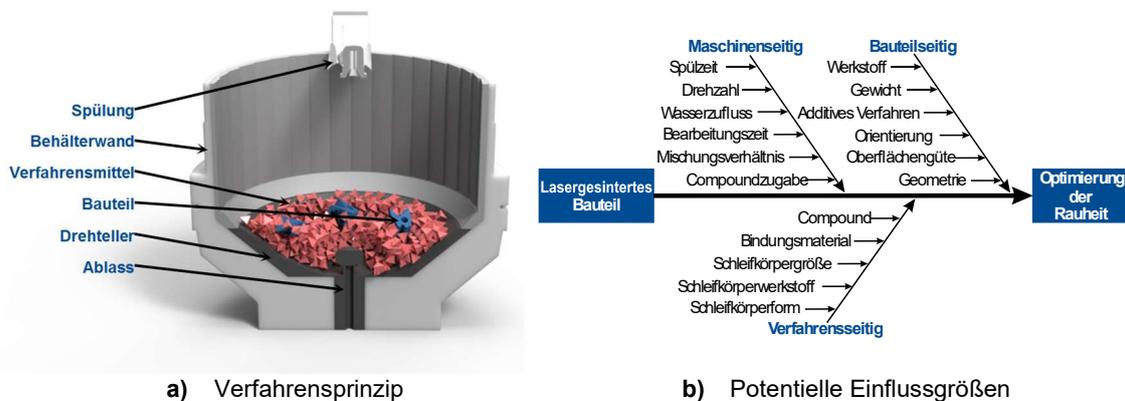


Bild 8-9 - Verfahrensanalyse Gleitschleifen

Bei der Verwendung der Verfahrensmittel steht ein breites Spektrum verschiedener Materialien (z. B. *Naturstein*, *synthetische Schleifkörper*, *gebundene Körper*, *Kunststoff*), Geometrien (z. B. *Kugel*, *Dreieck*, *Pyramide*, *Rhombus*, *Zylinder*, *Würfel*, *Kegel*) und Größen (*1 mm*

- 15 mm) zur Verfügung [258] [259] [256]. Um diese sinnvoll eingrenzen zu können, wird der Probenkörper *PKG_02* unter konstanten Bedingungen (*Drehzahl: 200 U/min, Verfahrensmittelmenge: 2 kg, Wassermenge: 5 l/h, Bearbeitungszeit: 1 h*) mit verschiedenen Verfahrensmitteln untersucht, vergleiche Bild 8-10 a). Zunächst ist festzuhalten, dass die Flächenorientierung 135° weniger stark als die restlichen Flächen bearbeitet wird. Die dargestellten Flächen 90° und 180° weisen konstant die niedrigsten Messwerte auf. Im Ergebnis zeigen sich keramische Schleifkörper besser geeignet als Schleifkörper aus Kunststoff. Auf Grund der höheren Härte üben diese höhere Reibungskräfte auf die Bauteiloberflächen aus und bearbeiten diese somit intensiver. Dementsprechend höher ist auch der Abtrag. Weiter erzielten die dreiecksförmigen keramischen Schleifmittel mit einer Steigerung von 59,67 % auf $Rz_{90} = 35,02 \mu\text{m}$, respektive 32,52 % auf $Rz_{135} = 78,39 \mu\text{m}$ und 64,68 % auf $Rz_{180} = 31,98 \mu\text{m}$ die besten Ergebnisse und werden demnach für die folgenden Versuche verwendet.

Analog zu den Versuchen innerhalb des Strahlverfahrens wird weiter der Einfluss der Bearbeitungszeit auf die Oberflächengüte und den Masseverlust als Maß für den Abtrag erfasst, siehe Bild 8-10 b). Ausschlaggebend für das Schleifergebnis ist die erste Bearbeitungsstunde, in der die Oberflächengüte um 65,17 % verbessert wird. Die Optimierung der Oberflächengüte zeigt einen regressiven Verlauf hin zu höheren Bearbeitungszeiten. Die prozentuale Verbesserung nimmt mit der weiteren Bearbeitungszeit besonders bei den leicht zugänglichen Bauteiloberflächen ($\alpha = 90^\circ$ und $\alpha = 180^\circ$) ab und erreicht nach 120 min ihr Minimum. Wie zu erwarten, nimmt der prozentuale Abtrag verglichen mit der unbearbeiteten Probe degressiv zu. Ausgehend von den Ergebnissen wird hier eine Bearbeitungsdauer von $t = 60 \text{ min}$ als effektivsten eingeschätzt.

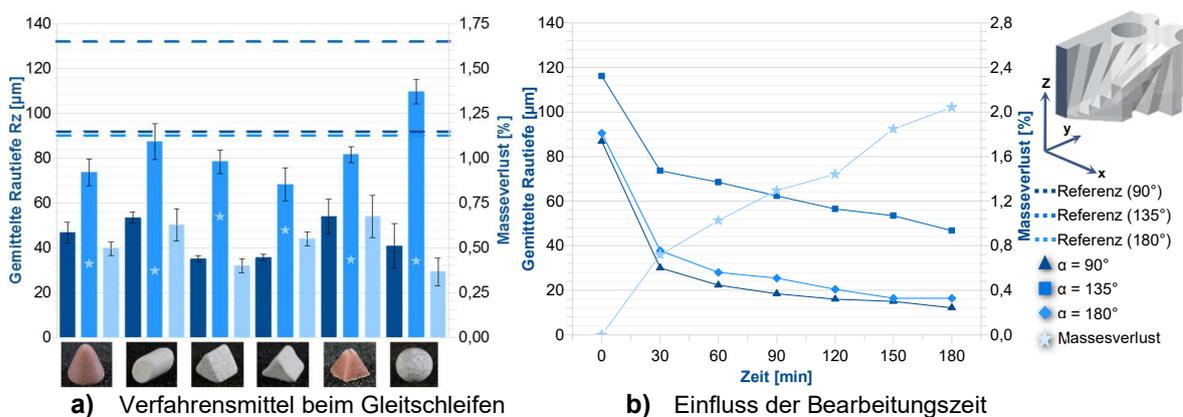


Bild 8-10 - Einfluss verschiedener Verfahrensmittel und variierender Bearbeitungszeit innerhalb des Gleitschleifverfahrens

Nach Eingrenzung der Einflussfaktoren wird im Folgenden ein L_9 -Versuchsplan nach Taguchi aufgestellt, um im weiteren Verlauf die Gleitschleifmittelgröße (3/3, 4/4, 6/6) die Umdrehungsgeschwindigkeit (240 U/min, 285 U/min, 330 U/min) und die Schleifmittelmenge (1000 g, 2000 g, 3000 g) zu untersuchen. Die Versuche werden weiter unter konstanten Bedingungen mit dem dreiecksförmigen Verfahrensmittel des Typs *DM* mit einer Bearbeitungsdauer von $t = 60 \text{ min}$ durchgeführt.

Wie in Bild 8-11 a) dargestellt, haben sich mit der Parametereinstellung des neunten Versuchs die besten Ergebnisse erzielen lassen. Mit der mittleren Füllmenge (2000 g), der größten Schleifmittelgeometrie (6/6 mm) und der höchsten Umdrehungsgeschwindigkeit (330 U/min) verbessert sich die Oberflächengüte bei einer Bauteilorientierung von 90° um 63 % auf $Rz_{90^\circ} = 32,89 \mu\text{m}$, bei 135° um 35 % auf $Rz_{135^\circ} = 75,11 \mu\text{m}$ und bei 180° um 70 % auf $Rz_{180^\circ} = 27,97 \mu\text{m}$. Im Mittel konnte die Oberflächengüte des gesamten Bauteils somit

um über 57 % gesteigert werden. Gleichzeitig verringert sich die absolute Masse um 2,5 %. Die Bedeutung der Faktoren wurde weiter mit der Wirkungsanalyse betrachtet, vergleiche Bild 8-11 b). Es zeigt sich, dass die Oberflächengüte durch die Schleifmittelgröße am stärksten beeinflusst wird, da hier die größte Spannweite zwischen den jeweiligen Faktorstufen zu beobachten ist. Bestätigt wird die Beobachtung durch die Varianzanalyse, nach deren die Schleifmittelgröße als hochsignifikant eingestuft wird. Die Schleifmittelmenge ist ebenfalls relevant, die Bedeutung der Umdrehungsgeschwindigkeit hingegen ist in Abhängigkeit der Oberflächenorientierung relativ gering. Der Materialabtrag verhält sich proportional zur Verbesserung der Oberflächengüte. Eine Senkung der Oberflächenrauheit führt zwangsläufig zu einer Erhöhung des Materialabtrages. Bei der Betrachtung der Kantenverrundung führen die mittleren Faktorstufen zu einem optimalen Ergebnis. Insgesamt konnten alle maßgeblichen Haupteinflussgrößen identifiziert und deren Einfluss auf die betrachteten Zielgrößen bestimmt werden. Durch die Findung optimierter Einstellparameter konnte die Oberflächengüte innerhalb der Nachbearbeitung der lasergesinterter Bauteiloberflächen durch das Gleitschleifen signifikant verbessert werden. Ebenfalls wird die Form- und Maßhaltigkeit in Abhängigkeit von der Intensivität der Bearbeitung negativ beeinträchtigt. Durch die teilautomatisierte Verfahrensweise lassen sich reproduzierbare Eigenschaften einstellen. Analog zum Strahlprozess sind dem Gleitschleifprozess auch im Hinblick auf die Nachbearbeitung innenliegender Flächen Restriktionen gesetzt.

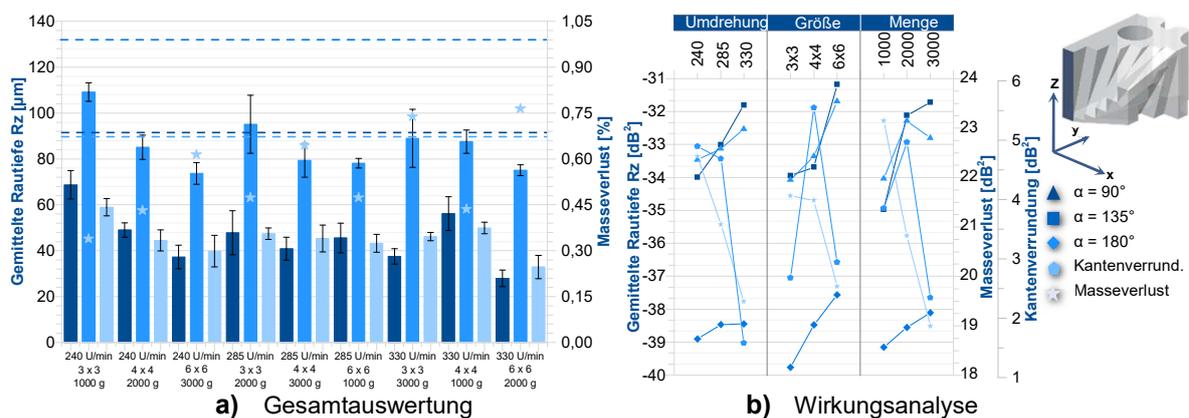


Bild 8-11 - Auswertung der Gleitschleifversuche

8.4 Chemische Nachbearbeitung durch das Tauchätzen

Beim Tauchätzen, welches den Nassätzverfahren zugeordnet wird, erfolgt die Bearbeitung durch Eintauchen der Bauteile in einen mit einem Wirkmedium gefüllten Behälter, vergleiche Bild 8-12 a). Durch den im Behälter befindlichen Magnetührstab wird das Fluid gleichmäßig umgewälzt, sodass eine homogene Temperaturverteilung gewährleistet ist. Der Ätzangriff erfolgt hier isotrop, es erfolgt eine Umwandlung des festen Materials der Schicht in eine flüssige Verbindung. Die Selektivität ist prinzipiell sehr hoch, da die eingesetzten Wirkmedien genau auf das vorhandene Material abgestimmt werden können. Analog zu den bereits analysierten Verfahren ist auch die Eignung der chemischen Nachbearbeitung durch das Tauchätzen von einer Reihe von in Bild 8-12 b) dargestellten Einflussgrößen abhängig.

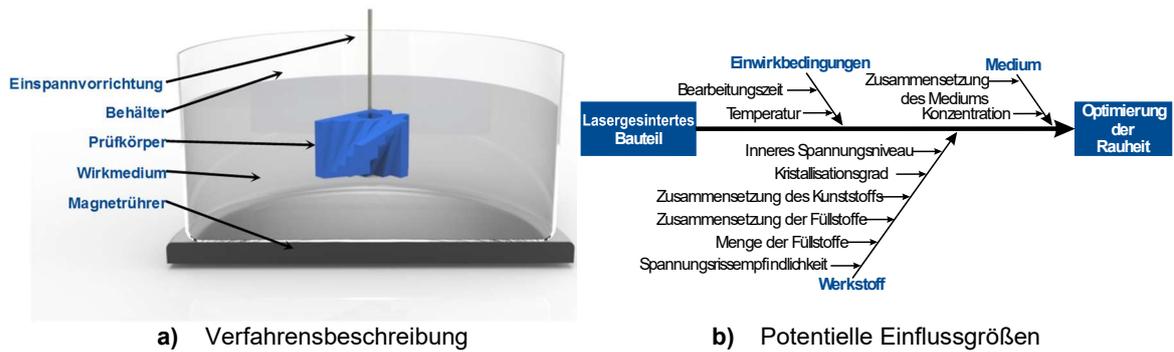


Bild 8-12 - Verfahrensanalyse chemisches Ätzen

Aufbauend auf den in Kapitel 5.1 hergeleiteten Erkenntnissen werden anhand definierter Anforderungsprofile in erster Instanz Wirkmedien ermittelt, gegen welche der Werkstoff Polypropylen prinzipiell Unbeständigkeiten aufweist und folglich eine Reaktion an der Bauteiloberfläche zu erwarten ist. Innerhalb von weiteren Beständigkeitsuntersuchungen wird der Einfluss der ausgewählten Wirkmedien sowohl auf die gemittelte Rautiefe R_z als auch auf die Farbgebung ΔE untersucht. Da die maßgebliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Prozesskontrolle eine reproduzierbare Einsatzqualität des Wirkmediums ist, werden innerhalb der Versuche zu jeder Zeit nicht genutzte Wirkmedien eingesetzt. Alle Wirkmedien, welche eine positive Reaktion auf die Oberfläche der lasergesinterter Bauteile hervorrufen, werden im Folgenden weiter betrachtet. Dabei werden maßgeblich die Haupteinflussgrößen Temperatur und Bearbeitungszeit in Hinblick auf die geometrischen Produktspezifikationen sowie die mechanischen Eigenschaften untersucht.

8.4.1 Eingrenzung potentieller Wirkmedien

Der in Formel 5-2 eingeführte Hildebrand'sche Löslichkeitsparameter stellt eine Bewertungszahl für die Lösungs- und Quellgeschwindigkeit dar. Dabei ist eine Quellung oder Lösung umso effektiver, je näher die Löslichkeitsparameter von Polymer und einwirkendem Medium beieinander liegen. Nach Ehrenstein und Pongratz erweist sich der Löslichkeitsparameter alleine allerdings als wenig praktikabel, da dieser lediglich energetische Werte erfasst, jedoch Wasserstoffbrücken nicht berücksichtigt [242]. Da also nicht alle Aspekte für die Betrachtung der Löslichkeit einbezogen werden, ist dessen Aussagekraft stets kritisch zu betrachten. Eine genauere Aussage bietet der Hansen'sche Löslichkeitsparameter (engl. *Hansen Solubility Parameter*), welcher grundsätzlich auf den Erkenntnissen von Hildebrand basiert. Explizit zerlegt Charles M. Hansen diesen in die drei folgenden Einzelbeträge, die ihren zwischenmolekularen Wechselwirkungen entsprechen:

$$\delta_d = \left(\sum_z {}^z F_d \right) / V \quad \text{Formel 8-1}$$

$$\delta_p = \left(\sum_z {}^z F_p^2 \right)^{1/2} / V \quad \text{Formel 8-2}$$

$$\delta_h = \left(- \sum_z {}^z U_h / V \right)^{1/2} \quad \text{Formel 8-3}$$

Hierbei entspricht der Hildebrand'sche Löslichkeitsparameter δ dem Längenvektor des Hansen'schen Löslichkeitsparameter δ_{SP} , welcher sich durch die oben formulierten Dispersionskräfte δ_d , Dipolkräfte δ_p sowie die Wasserstoffbrückenbindungen δ_h nach Formel 8-4 berechnen lässt.

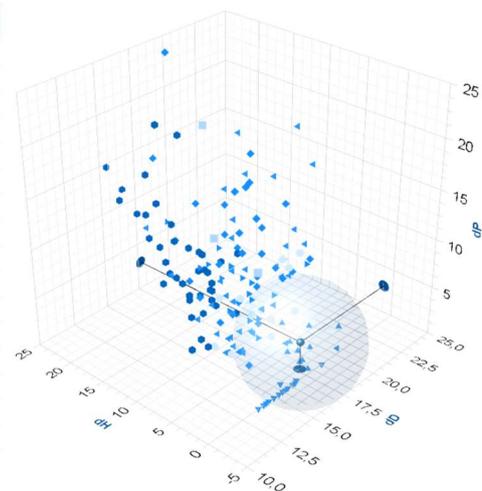
$$\delta_{SP}^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2$$

Formel 8-4

Des Weiteren wird für den zu lösenden Werkstoff ein sphärischer Raum mit dem Radius $R_{\delta t}$ um den Punkt des jeweiligen Polymers eingeführt, in dem eine Interaktion mit dem jeweiligen Wirkmedium zu erwarten ist. Um die Anzahl geeigneter Wirkmedien einzugrenzen, wird eine geeignete Auswahl anhand des Hansen'schen Löslichkeitsparameter ermittelt - der Radius $R_{\delta t}$ muss dabei geringer als der Abstand zwischen Löslichkeitsparameter des Wirkmediums und dem Werkstoff Polypropylen sein. Um ein sphärisches Volumen zu approximieren, wird der Faktor 4 vor den Dispersionskräften δ_d eingeführt. Neben der ausschlaggebenden Frage der Beständigkeit des Werkstückes im flüssigen Wirkmedium kommen weitere Kriterien hinzu, die zur Auswahl der zu testenden Wirkmedien führen. Darunter fallen physikalische Eigenschaften wie die Siedetemperatur, die Farbe des Wirkmediums im flüssigen Zustand, der Geruch, begleitend von potentiellen Gefahrenhinweisen. Darüber hinaus werden weitere Wirkmedien getestet, welche in erster Instanz augenscheinlich zwar keine Wirkung auf den Werkstoff Polypropylen zeigen, jedoch für alternative Kunststoffe ausgeprägte Unbeständigkeiten darstellen und demzufolge als Vergleich dienen sollen. Die in dieser Arbeit bearbeitete Auswahl an so ermittelten Wirkstoffen ist in Bild 8-13 a) dargestellt. Bild 8-13 b) wiederum zeigt den Hansen'schen Löslichkeitsparameter im dreidimensionalen Raum, wobei die Abszisse, Ordinate und Applikate den Parametern δ_d , δ_p und δ_h entsprechen.

Nr	Wirkmedium	Nr	Wirkmedium
Alkohole		Arom. Kohlenwasserstoffe	
A	Benzylalkohol	N	Benzol
B	Ethanol	O	n-Heptan
Laugen		P	Toluol
C	Natriumhydroxid	Q	m-Xylol
Kethone		Halog. Kohlenwasserstoffe	
D	Aceton	R	Chlorbenzol
Säuren		S	Chlorpentan
E	Ameisensäure	T	Dichlormethan
F	Königswasser	U	Trifluortrichlorethan
G	Perchlorsäure	V	Tetrachlorkohlenstoff
H	Salpetersäure (65%)	Öle	
I	Salpetersäure (100%)	W	Terpentin-Öl
J	Salzsäure (35%)	Gemische	
K	Schwefelsäure (>95%)	X	Benzin
L	Wasserstoffperoxid	Y	Terpentin-Ersatz
Aliph. Kohlenwasserstoffe			
M	Decalin		

a) Liste potentieller Wirkmedien



b) Hansen'sche Löslichkeitsparameter

Bild 8-13 - Eingrenzung potentieller Wirkmedien

Ausgehend von der ersten Eingrenzung der Wirkmedien folgt die Versuchsdurchführung der Beständigkeitsuntersuchung. Ziel ist hier zunächst die Findung eines geeigneten flüssigen Wirkmediums, welches in Folge von chemikalischen und / oder physikalischen Reaktionsmechanismen eine Änderung der Oberflächengüte hervorruft. Die Gewährleistung der weiteren geometrischen Produktspezifikationen sowie der mechanischen Eigenschaften soll an dieser Stelle zunächst zweitrangig sein. Die Versuchsdurchführung erfolgt dabei mit der Prüfkörpergeometrie *PKG_02* bei Raumtemperatur. Sofern sich hier keine Reaktion zeigt, wird die Temperatur intervallmäßig bis hin zum Siedepunkt des Wirkmediums erhöht, maximal bis zu einer Temperatur von 100 °C. Die Proben werden in einem exponentiell ansteigenden Zeitintervall in das Wirkmedium eingetaucht, die maximale Bearbeitungsdauer ist auf 512 min beschränkt - ein Wirkmedium, welches nach Ablauf der maximalen

Bearbeitungsdauer keinen Effekt bezüglich der gemittelten Rautiefe Rz bzw. des arithmetischen Mittenrauwertes Ra zeigt, wird als ungeeignet eingestuft. Die Ergebnisse sind in Bild 8-14 dargestellt.

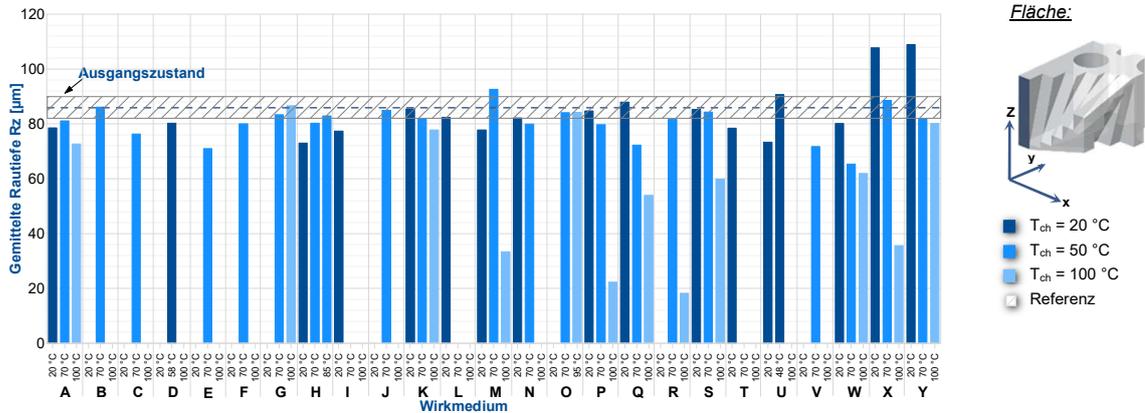
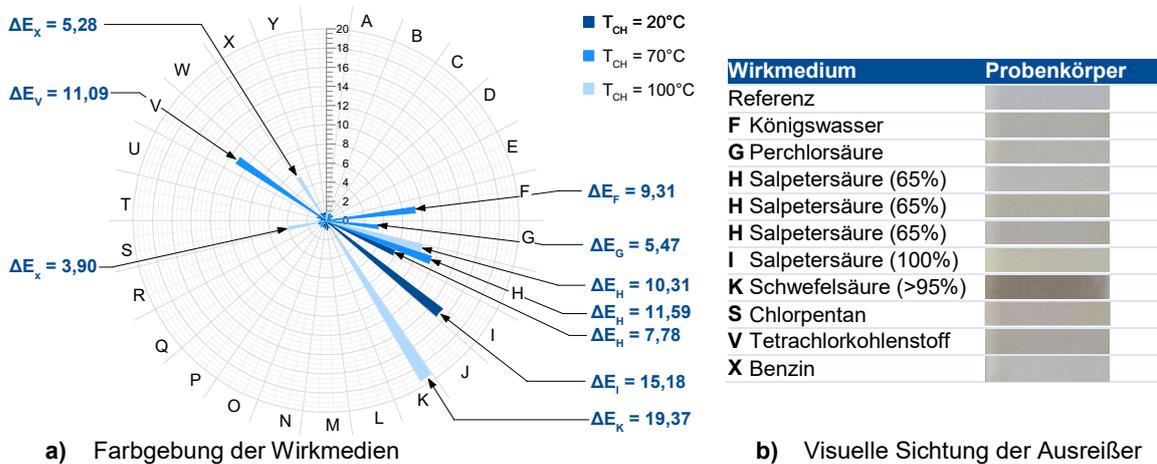


Bild 8-14 - Ergebnisdarstellung der Beständigkeitsuntersuchungen

Zunächst ist festzuhalten, dass keine der Wirkmedien bei Raumtemperatur eine messbare Reaktion hervorrufen. Erst mit ansteigenden Bearbeitungstemperaturen zeigen besonders die Kohlenwasserstoffe eine Wirkung auf die Oberflächengüte lasergesinteter Bauteile aus Polypropylen. Damit bestätigen sich die in Kapitel 5.1 definierten Annahmen. Im Detail ruft der aliphatische Kohlenwasserstoff Decalin (M) eine Verbesserung des arithmetischen Mittenrauwertes Rz von 61,62 % ($t_{ch} = 30\text{ min}$, $T_{ch} = 100\text{ °C}$) hervor. Innerhalb der aromatischen Kohlenwasserstoffe stechen besonders die Wirkmedien Toluol (P) und m-Xylol (Q) hervor. Erstere erzielt eine Verbesserung um 74,39 % auf $Rz = 22,24\text{ µm}$ ($t_{ch} = 30\text{ min}$, $T_{ch} = 100\text{ °C}$), zweiteres eine Verbesserung um 37,93 % auf $53,89\text{ µm}$ ($t_{ch} = 30\text{ min}$, $T_{ch} = 100\text{ °C}$). Innerhalb der Halogenwasserstoffe lässt sich durch Chlorpentan (S) eine gemittelte Rautiefe von $Rz = 59,92\text{ µm}$ ($t_{ch} = 30\text{ min}$, $T_{ch} = 100\text{ °C}$) erreichen. Darüber hinaus haben sowohl Benzin als auch Terpentinersatz als Vertreter der untersuchten Gemische die Oberflächengüte zunächst positiv beeinflussen können.

Bei der Analyse der Farbgebung nach der Ätzbearbeitung zeigt sich, dass maßgeblich Bauteile, welche mit säurehaltigen Wirkmedien nachbearbeitet wurden, durch eine hohe Farbabweichung geprägt sind. Allerdings ist weiter auch bei Medien wie Chlorpentan (S) oder Benzin (X), welche eine prinzipielle Verbesserung der Oberflächengüte hervorrufen, eine Farbabweichung unvermeidlich.



a) Farbgebung der Wirkmedien

b) Visuelle Sichtung der Ausreißer

Bild 8-15 - Farbgebung innerhalb der Beständigkeitsuntersuchungen

Als zusammenfassendes Ergebnis hat sich herausgestellt, dass maßgeblich Kohlenwasserstoffe eine positive Reaktion auf die Oberfläche lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen hervorrufen. Für die weiteren Untersuchungen werden daher die vier Wirkmedien Decalin (M), Toluol (P), m-Xylol (Q) und Terpentinersatz (Y) untersucht, welche alle der Hauptgruppe der Kohlenwasserstoffe zugeordnet werden können. Alle Wirkmedien liegen im sphärischen Raum von Polypropylen ($\delta_d = 18,0 \text{ Pa}^{1/2}$; $\delta_p = 17,7 \text{ Pa}^{1/2}$; $\delta_h = 2,9 \text{ Pa}^{1/2}$; $\delta_t = 1,2 \text{ Pa}^{1/2}$; $R_{\delta t} = 6,2$), welches die Beeinflussung des Kunststoffes durch die Chemikalien erklärt.

8.4.2 Einfluss auf die geometrischen Produktspezifikationen

Im Folgenden werden sowohl Bearbeitungstemperatur T_{ch} als auch Bearbeitungszeit t_{ch} gezielt variiert, um deren Wirkung auf die geometrischen Produktspezifikationen zu evaluieren. Das Vorgehen wird dabei möglichst konstant gehalten. Zunächst wird die Bearbeitungstemperatur bei konstanter Bearbeitungszeit stetig um $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ bis nahe dem Siedepunkt erhöht. In einem weiteren Untersuchungsschritt wird die Bearbeitungszeit in definierten Intervallen von 30 Sekunden erhöht.

- **Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit**

Der Einfluss der potentiellen Wirkmedien auf die gemittelte Rautiefe ist in Bild 8-16 dargestellt. Betrachtet wird der Übersichtlichkeit halber an dieser Stelle die in einer Orientierung von $\alpha = 90^\circ$ gefertigte Bauteiloberfläche. Alle untersuchten Betriebspunkte sind hierbei markiert. Des Weiteren ist die prozentuale Verbesserung der gemittelten Rautiefe bei markanten Versuchen aufgeführt. Allen vier untersuchten Wirkmedien ist zunächst gemein, dass sie die Oberflächengüte eklatant verbessern. Es zeigt sich, dass sowohl die Bearbeitungstemperatur als auch die Bearbeitungszeit einen herausragenden Einfluss auf die gemittelte Rautiefe haben - jedoch in verschiedener Ausprägung in Abhängigkeit vom betrachteten Wirkmedium. Mit Anstieg der Prozesstemperatur steigt die Molekularbewegung. Die relevanten Prozesse laufen je $10 \text{ }^\circ\text{C}$ Temperaturerhöhung etwa drei bis vier Mal schneller ab. Dementsprechend ist auch eine Verbesserung der Oberflächengüte mit erhöhter Bearbeitungstemperatur sichtbar. Dabei zeigt das bitykliche Alkan Decalin weit unterhalb seines Siedepunktes, welcher zwischen $189 \text{ }^\circ\text{C}$ und $196 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt, bereits Optimierungen der gemittelten Rautiefe von bis zu $97,65 \%$. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Medien m-Xylol und Terpentinersatz. Lediglich Toluol zeigt erst nahe an seinem Siedepunkt von $110 \text{ }^\circ\text{C}$ einen Effekt bezüglich der Oberflächengüte und verbessert diese um bis zu $78,63 \%$.

Die aufgeführten Wirkmedien werden den physikalisch einwirkenden Medien zugeordnet - also Medien, welche nicht mit dem Kunststoff reagieren, sondern lediglich die physikalischen Bindungskräfte beeinflussen [260]. Werden Kunststoffe im Allgemeinen mit so einem Medium in Kontakt gebracht, so dringen in das Gefüge des Polymers oder in mikroskopische Fehlstellen bzw. Lunker ein. Dabei werden die intermolekularen Kräfte reduziert und damit die Beweglichkeit der Makromoleküle erhöht, ein Vorgang, welcher bedingt reversibel ist, sobald das Medium dem Kunststoff wieder entzogen wird. In Abhängigkeit von den Alterungsvorgängen ist die Wirkung am Werkstoff nach DIN 50035 [261] von einer Reihe von Alterungserscheinungen gekennzeichnet, welche als sichtbare oder messbare Wirkungen der Alterungsursachen definiert sind. Hierzu zählen *Verwerfung*, *Rissbildung* (z.B. Spannungsrisssbildung), *Quellung*, *Nachschwindung*, *Ab- oder Ausscheidungen*, *Bruchbildung* (lokale Versprödung, Ermüdung), *Verfärbung*, *Veränderung des Oberflächenglanzes*, *messbare Veränderung der Materialeigenschaften* (z.B. mechanisch), *Veränderung des chemischen Verhaltens*.

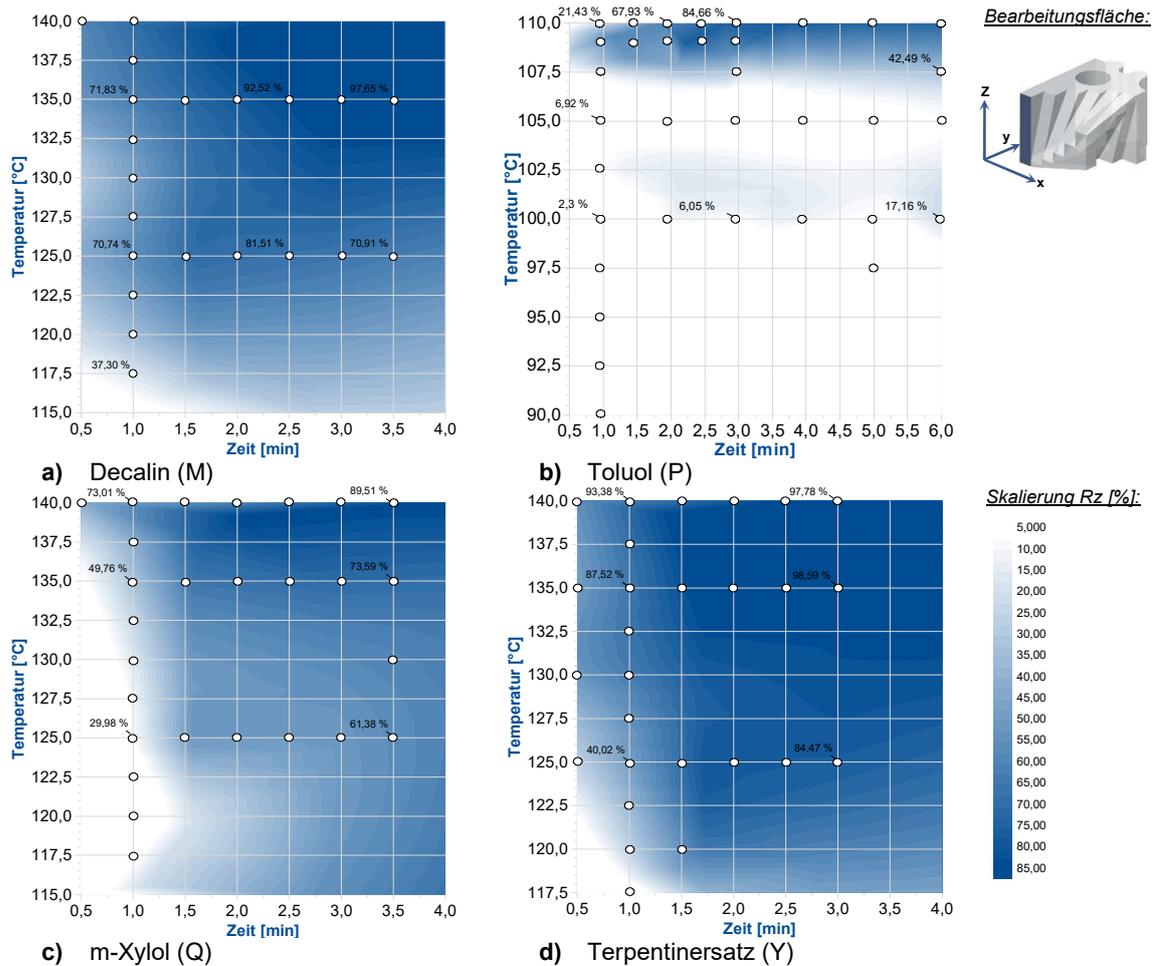


Bild 8-16 - Einfluss von Temperatur und Zeit ausgewählter Wirkmedien auf Rz

Die Verschleißerscheinungen sind dabei miteinander verbunden und treten somit meist in Kombination auf. Da die Medienaufnahme ein instationärer Prozess ist, quillt zunächst der Randbereich auf ohne das Innere im Werkstoff zu beeinflussen. Dabei entstehen Eigenstressungen im Werkstoff, welche zu Rissbildungen führen können, wie in der mikroskopischen Aufnahme im Fall von m-Xylol und Terpentinersatz in Bild 8-17 zu erkennen ist. Begünstigt durch die hohen Bearbeitungstemperaturen nahe des Schmelzpunktes von Polypolypropylen, vergleiche Bild 5-2, verschmelzen die Pulverpartikelanhaftungen sowohl bei Decalin als auch bei m-Xylol und Terpentinersatz miteinander, wobei bei Nachbehandlung mit ersterem Wirkmedium die Anhaftungen durch die sichtbaren Leerstellen noch zu erahnen sind. Darüber hinaus sind beim Einsatz von Toluol noch vereinzelt Partikel an der Oberfläche identifizierbar, die maximale Bearbeitungstemperatur liegt hier bei $T_{ch} = 110\text{ °C}$.

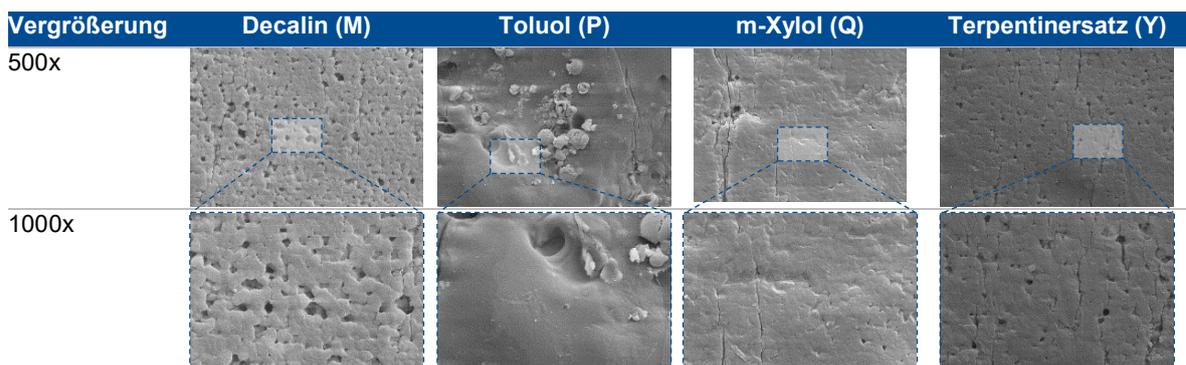


Bild 8-17 - Mikroskopische Aufnahmen der nachbehandelten Oberflächen

▪ Einfluss auf die Form- und Maßhaltigkeit

Nachdem im vorherigen Abschnitt der Einfluss der Wirkmedien auf die gemittelte Rautiefe als Oberflächenqualitätsmerkmal erfolgreich analysiert wurde, werden die Untersuchungen an dieser Stelle auf die Form- und Maßhaltigkeit ausgeweitet. Als Maß für die quantitativen Werkstückveränderungen wird hier zunächst in Bild 8-18 die prozentuale Masseabweichung, auch Quellverhältnis genannt, der Wirkmedien auf die Prüfkörpergeometrie in Abhängigkeit sowohl von Temperatur als auch der Bearbeitungszeit dargestellt.

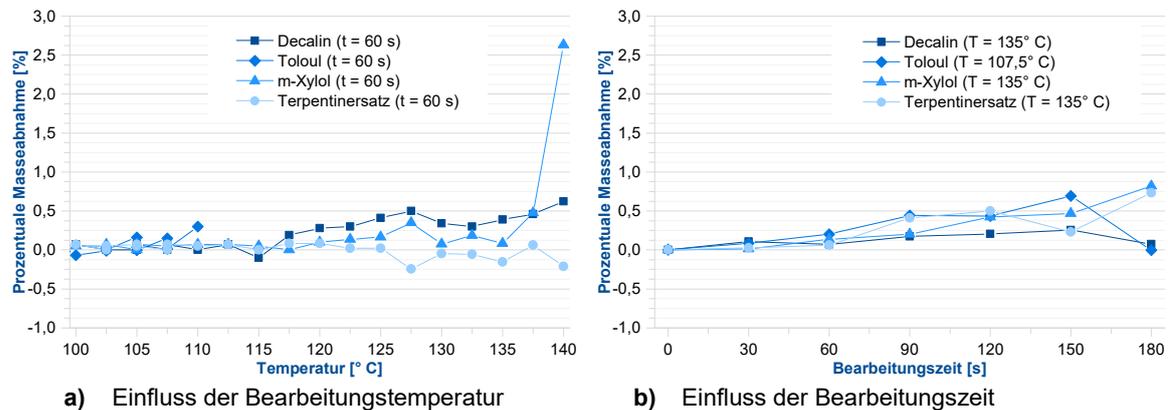


Bild 8-18 - Prozentuale Gewichtsabweichung ausgewählter Wirkmedien

Die Masse nach der Behandlung wird dabei zum einen durch die Aufnahme des Wirkmediums und zum anderen durch das Herauslösen von Bestandteilen geprägt. Es zeigt sich, dass die Masseänderung in Abhängigkeit sowohl von Bearbeitungszeit und -temperatur relativ konstant bleibt. Wie zu erwarten nimmt die Aufnahme des Mediums mit der Einwirkzeit nicht zu, sondern strebt als typische Eigenschaft bei nicht solvatisierten Medien einem Sättigungszustand entgegen - lediglich bei m-Xylol ist eine sprunghafte Masseabnahme bei der Siedetemperatur zu verzeichnen, die Extraktion von löslichen Bestandteilen übersteigt hier die Quellung. Da sich das Medium nach der Behandlung zum Teil oder auch vollständig wieder verflüchtigt, kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil ausgeschiedener Bestandteile gering ist. Induziert durch das Eindringen des Wirkmediums in das Gefüge des Polymers und mikroskopischen Fehlstellen sowie Lunker und der dadurch reduzierten intermolekularen Kräfte sind Quellvorgänge besonders in hohen Temperatur- und Bearbeitungsbereichen zu beobachten. Bei der Betrachtung der Formelemente bedeutet dies, dass extrudierte Elemente wie Zylinder oder Quader durch eine negative Formabweichung, subtrahierende Elemente wie Bohrungen oder Spaltmaße durch eine positive Formabweichung gekennzeichnet sind, vergleiche Bild 8-19 a). Dem gegenübergestellt sind die Ab- und Ausscheidvorgänge, welche bei extrudierten Formelementen eine positive Abweichung und bei subtrahierenden Elementen eine negative Formabweichung hervorrufen. In Abhängigkeit vom eingesetzten Wirkmedium sowie den Einstellparametern resultiert die Kombination der genannten Vorgänge in expliziten Verschleißerscheinungen an Kanten und Ecken, siehe Bild 8-19 b). Weiter erwirkt das in Folge der Permeation diffundierte Wirkmedium eine Erweichung des Materials mit dem Ergebnis, dass die Standfestigkeit kleinerer Formelemente nicht gegeben ist und diese daher ermüden oder sich sogar vom Prüfkörper lösen, siehe Bild 8-19 c). Darüber hinaus führt eine zu intensive Bearbeitung und die daraus resultierende Erweichung des Werkstoffs sowie Ab- und Ausscheidungen dazu, dass sich Bestandteile lösen, aber unmittelbar nach der Bauteilentnahme an der Oberfläche des Werkstücks haften bleiben. Diese sammeln sich entweder an der Unterseite des zu bearbeitenden Bauteils oder an entsprechenden Formelementen an, vergleiche Bild 8-19 d) und Bild

8-19 e). Alle genannten Defekte wurden bei den folgenden Auswertungen entsprechend mit einbezogen.

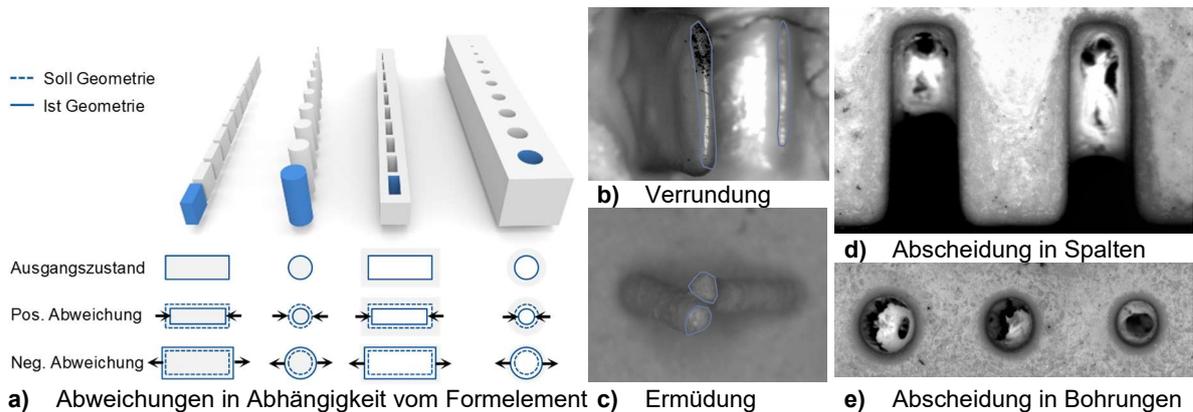


Bild 8-19 - Verformungsdefekte bei der chemischen Nachbearbeitung

Analog zu der Herangehensweise innerhalb des Kapitels 5.4.3 werden zur Untersuchung genannter Mechanismen und deren resultierenden Defekten die reduzierten Grundkörpergeometrien Bohrungen, Spaltmaße, Zylinder sowie Wandstärken mit Hilfe des Prüfkörpers *PKG_01* analysiert. Untersucht wird zunächst der Einfluss der Bearbeitungstemperatur bei einer konstanten Bearbeitungszeit von 60 s. In einem zweiten Schritt wird bei geeigneter Temperatur der Einfluss der Bearbeitungszeit analysiert. Die weiteren Darstellungen beziehen sich weiter zunächst auf die definierte Formelementgröße von 2,0 mm. Alle weiteren Größen fließen mit in die Analysen ein, werden der Übersichtlichkeit halber allerdings nicht visuell dargestellt.

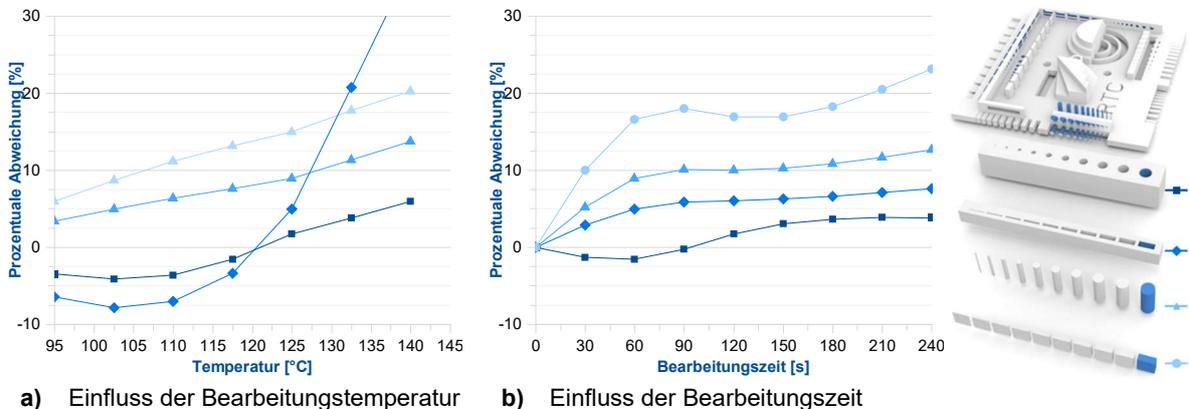


Bild 8-20 - Einfluss von Decalin auf die Grundkörpergeometrien

Bei der chemischen Nachbehandlung mit dem Wirkmedium Decalin sind die Alterungserscheinungen bei den extrudierten Formelementen Zylinder und Wandstärken maßgeblich durch einen Materialabtrag gekennzeichnet, welcher mit Erhöhung der Bearbeitungstemperatur und -zeit gleichermaßen zunimmt, vergleiche Bild 8-20. Bohrungen und Spalte hingegen sind analog dazu zunächst durch einen Abtrag gekennzeichnet. Mit Erhöhung beider Prozessgrößen sammeln sich die Abscheidungen jedoch in vermehrter Form und setzen sich innerhalb der Elemente ab, der Einfluss der Prozessstemperatur ist dabei vorherrschend. In Abhängigkeit von der Elementgröße steigen die prozentualen Abweichungen - unabhängig von der Elementform - bis zu 38,56 %. Darüber hinaus lösen sich mit steigenden Temperaturen zylindrische Elemente kleineren Durchmessers. Demnach können bei einer Temperatur von $T_{ch} = 125 \text{ °C}$ schon Durchmesser kleiner $\varnothing = 0,6 \text{ mm}$ nicht mehr dargestellt werden. Bei $T_{ch} = 132,5 \text{ °C}$ beträgt der minimale darstellbare Durchmesser bereits

$\varnothing = 1,0$ mm. Eine Bearbeitungstemperatur jenseits $T_{ch} = 125$ °C bei einer Bearbeitungsdauer von $t_{ch} = 60$ s ist daher nicht zu empfehlen, da zum einen die prozentualen Abweichungen ein vertretbares Maß überschreiten und sich zum anderen sowohl extrudierte Elemente lösen als auch subtrahierte Elemente zusetzen bzw. sich Materialanlagerungen anhäufen.

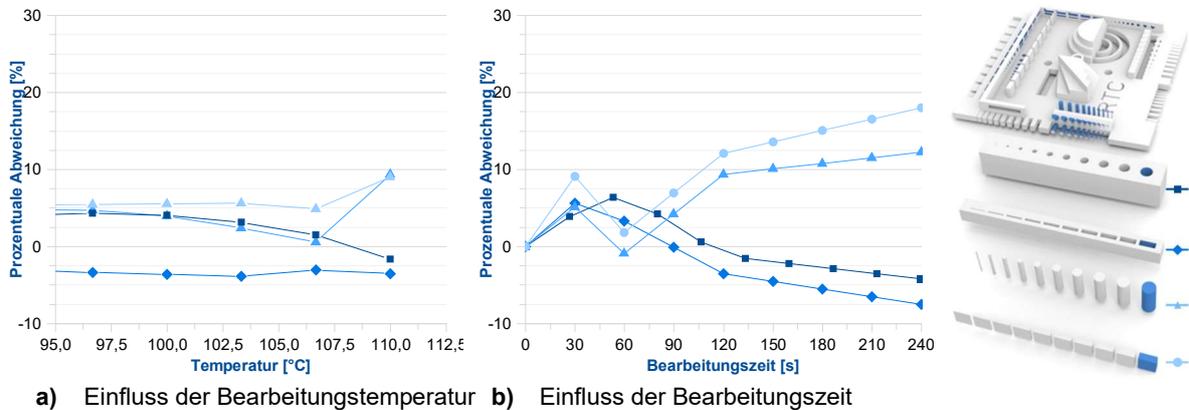


Bild 8-21 - Einfluss von Toluol auf die reduzierten Grundkörpergeometrien

Die Auswertung der Formhaltigkeit bei der Nachbehandlung durch das Wirkmedium Toluol ist in Bild 8-21 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Bearbeitungstemperatur bis zur Siedetemperatur von Toluol keinen nennenswerten Einfluss auf alle betrachteten Formelemente hat, lediglich bei einer Temperatur von $T_{ch} = 110$ °C treten Abweichungen bis zu 9,36 % bei den zylindrischen und quaderförmigen Elementen auf. Die Erhöhung der Bearbeitungszeit bei konstanter Temperatur von $T_{ch} = 110$ °C zeigt ab 90 s deutliche Abtragerscheinungen, welche sich degressiv einem Maximum annähern. So vergrößern sich Bohrungen und Spalte um bis zu 8,12 %, während sich die extrudierten Elemente um bis zu 18,56 % verringern. Im Gegensatz zum vorher betrachteten Wirkmedium Decalin sind Materialablagerungen grundsätzlich im wesentlich geringeren Umfang zu identifizieren und treten lediglich bei längeren Bearbeitungszeiten in Erscheinung. Auch die Darstellung von Formelementen kleinerer Durchmesser bzw. kleinerer Größe ist bis zu einer Bearbeitungszeit von 90 s analog zur Formelementgröße von 2,0 mm gegeben.

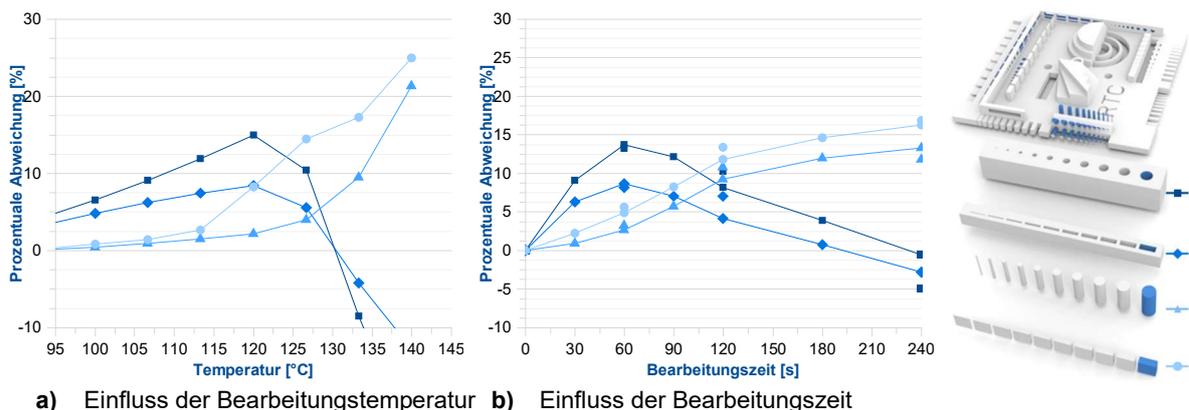


Bild 8-22 - Einfluss von m-Xylol auf die reduzierten Grundkörpergeometrien

Das Verhalten der extrudierten Formelemente wie den quaderförmigen und zylindrischen Formen ähnelt bei der Nachbehandlung durch das Wirkmedium m-Xylol prinzipiell dem von Decalin, siehe Bild 8-22. Jedoch lässt sich hier ein progressiver Anstieg der prozentualen Formabweichung mit steigender Bearbeitungstemperatur identifizieren. Dem gegenübergestellt verkleinern sich die subtrahierten Elemente bei einem Temperaturanstieg zunächst.

Das heißt, das Material quillt auf, bevor diese ab einer Bearbeitungstemperatur von $T_{ch} = 125 \text{ °C}$ begründet durch Ab- und Ausscheidemechanismen sich vergrößern und jenseits von 30 % von der Originalgeometrie abweichen. Die Erhöhung der Bearbeitungszeit bei einer konstanten Temperatur von $T_{ch} = 125 \text{ °C}$ zeigt simultane Ergebnisse, jedoch nähern sich die resultierenden Abweichungen hier degressiv einem festen Wert an. Weiter übersteigen die maximalen Abweichungen hier nicht die 20 %, der Einfluss der Bearbeitungszeit kann somit als geringer eingestuft werden. Auch hier sind besonders kleinere Formelemente durch die genannten Verschleißmechanismen von Defekten geprägt, welche sich mit Erhöhung beider Einstellfaktoren auch auf größere Geometrien ausweiten. Begründet durch den hohen Abtrag sind auch die Materialanhäufungen in den entscheidenden Prozessbereichen ausgeprägt.

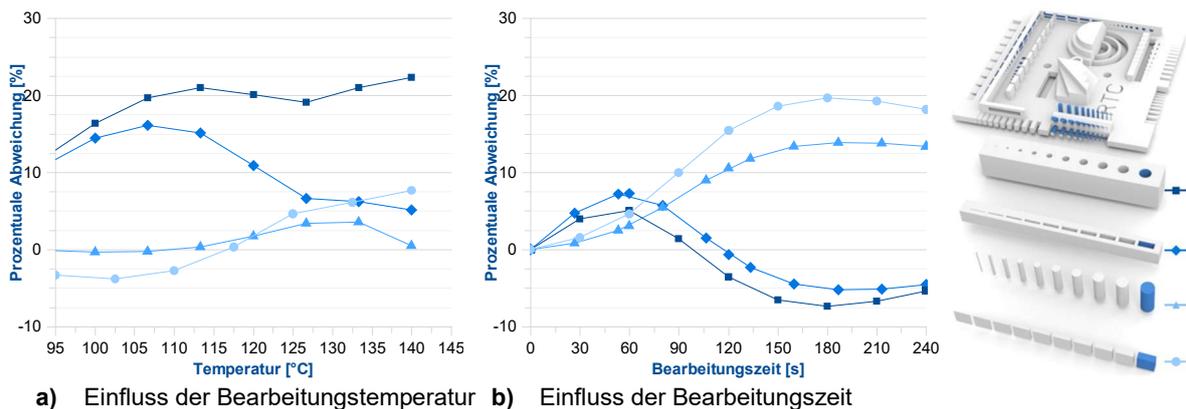


Bild 8-23 - Einfluss von Terpentinersatz auf die reduzierten Grundkörpergeometrien

Innerhalb der Nachbehandlung durch das Wirkmedium Terpentinersatz lassen sich große Parallelen zum Wirkmedium m-Xylol aber auch Decalin bezüglich der Alterungsmechanismen und daraus resultierenden prozentualen Abweichungen identifizieren, vergleiche Bild 8-23. Bis zu einer Temperatur von $T_{ch} = 125 \text{ °C}$ zeigt sich keine Änderung extrudierter Formkörper, lediglich Spaltmaße und Bohrungen sind durch eine hohe Abweichung von bis zu 21,42 % auf Grund von Quellung gekennzeichnet. Die Erhöhung der Bearbeitungszeit bei eben jener Temperatur zeigt, dass ab einer Bearbeitungszeit größer $t_{ch} = 60 \text{ s}$ alle untersuchten Formelemente durch einen degressiv ansteigenden Abtrag gekennzeichnet sind. Das Umschmelzen bewirkt geringe Ablagerung auf der Grundplatte und innerhalb der Elemente, so dass dieser Verschleiß nahezu identisch mit der Nachbearbeitung von Toluol ist. Dementsprechend sind auch kleinere Formelemente (kleiner $0,8 \text{ mm}$) in höheren Bearbeitungstemperatur- und -zeitbereichen noch darstellbar.

▪ Definition eines optimierten Prozessparameterfenster

Prinzipiell lassen sich eine optimierte Oberflächengüte und die Gewährleistung der Form- und Maßhaltigkeit innerhalb der chemischen Nachbehandlung nur bedingt mit einander vereinbaren. Das Verhalten aller betrachteten Wirkmedien ist dabei grundsätzlich miteinander zu vergleichen. Alle Wirkmedien zeigen erst mit Versuchstemperaturen jenseits der 100 °C einen positiven Effekt hinsichtlich der Optimierung der Oberflächengüte, repräsentiert durch die gemittelte Rautiefe sowie den arithmetischen Mittenrauwert. Mit weiterer Erhöhung hin zum Siedepunkt des jeweiligen Wirkmediums sind weitere Verbesserungen zu beobachten. Simultan dazu nehmen sowohl Maß- als auch Formhaltigkeit der untersuchten Prüfkörpergeometrien exponentiell ab - hier zeigen besonders die Wirkmedien Decalin und m-Xylol durch ihre aggressive Bearbeitung hohe Verschleißerscheinungen, welche sich in Erweichungen sowie Materialanlagerungen bemerkbar machen. Insgesamt ergeben sich in Abhängigkeit vom Wirkmedium schmale Verarbeitungsfenster.

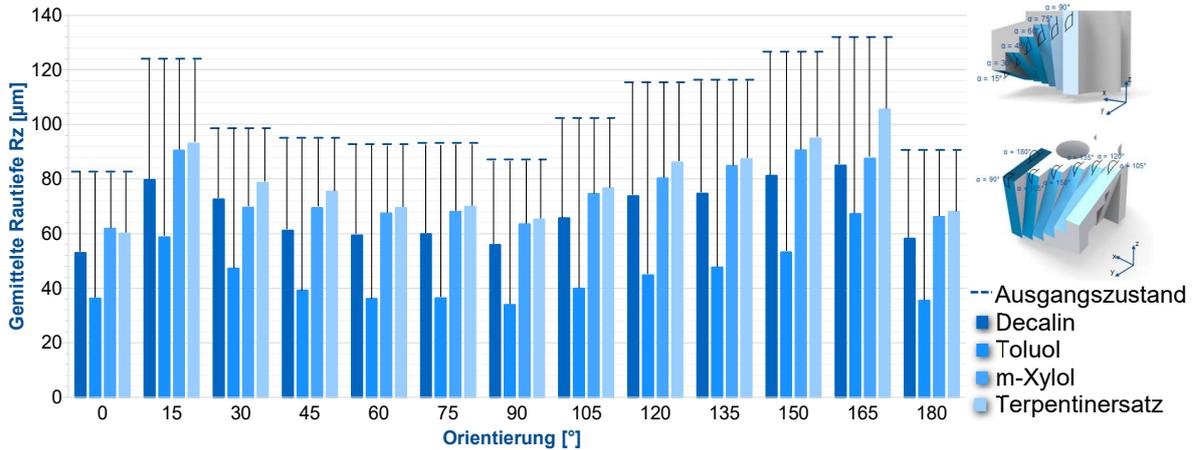


Bild 8-24 - Oberflächengüte nach der chemischen Nachbearbeitung mit optimiertem Parametersatz

Aufbauend auf der Findung eines optimierten Prozessparameterfensters wird für jedes untersuchte Wirkmedium ein Betriebspunkt identifiziert, bei welchem zum einen die Oberflächengüte maximal verbessert und zum anderen die Form- und Maßhaltigkeit eingehalten wird. Zur Validierung werden beim so ermittelten Betriebspunkt sowohl die Prüfkörpergeometrie *PKG_01* als auch *PKG_02* nachbehandelt, die Ergebnisanalyse bezüglich der Oberflächengüte ist in Bild 8-24 visualisiert. Es zeigt sich, dass zunächst alle Wirkmedien eine Verbesserung der gemittelten Rautiefe erwirken. Vor allem bei den Wirkmedien Decalin und m-Xylol, aber auch innerhalb der Nachbehandlung durch Terpentinersatz, müssen zur Einhaltung der Form- und Maßhaltigkeit konservative Prozessparameter gewählt werden, so dass hier die in Kapitel 8.4.2 erfassten maximalen prozentualen Verbesserungen der Oberflächengüte nicht erreicht werden können. Demnach birgt das Medium Toluol ein hohes Potential, besonders kritische Bauteilflächenorientierungen von 15° oder auch 165° werden um bis zu 60,91 % optimiert.

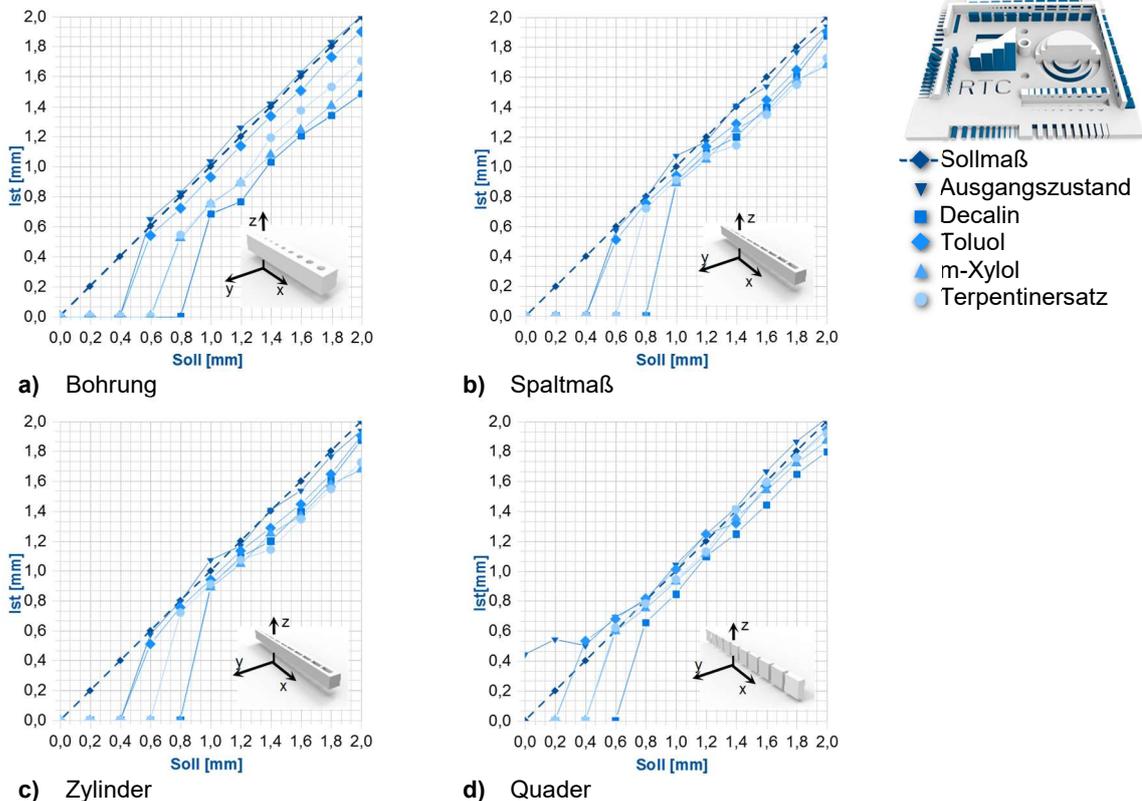


Bild 8-25 - Formhaltigkeit nach der chemischen Nachbearbeitung mit optimiertem Parametersatz

Trotz des Kompromisses zwischen der Optimierung der Oberflächengüte und gleichzeitiger Garantie der Form- und Maßhaltigkeit, kann letztere bei den Wirkmedien Decalin und m-Xylol aber auch Terpentinersatz nur bedingt eingehalten werden, vergleiche Bild 8-25. So sind bei allen drei genannten Wirkmedien prozentuale Abweichungen aller Formelemente zu verzeichnen. Formelemente mit einer Größe kleiner 0,8 mm werden auf Grund von Ab- und Ausscheidemechanismen nicht mehr dargestellt. Darüber hinaus sind besonders bei den Wirkmedien Decalin sowie m-Xylol trotz reduzierter Bearbeitungstemperaturen und -zeiten Materialablagerungen unterhalb der Bauteile und in Kantenbereichen zu identifizieren. Genannte Mechanismen treten bei der Nachbehandlung mittels Toluol nicht bzw. nur bedingt auf, so betragen die maximalen Abweichungen zum Ausgangszustand bei Bohrungen 9,65 % (0,6 mm), bei Spalten 8,28 % (0,4 mm), bei zylindrischen Elementen 13,11 % (0,4 mm) und schließlich bei quaderförmigen Elementen 5,89 % (0,4 mm).

8.4.3 Einfluss auf die werkstoffmechanischen Eigenschaften

Die vorangegangenen Analysen zeigen einen schmalen Verarbeitungsbereich, um die geometrischen Produktspezifikationen auf Seiten der Oberflächengüte zu optimieren und andererseits die Form- und Maßhaltigkeit beizubehalten. Zur Ermittlung potentieller Änderungen der mechanischen Eigenschaften in Folge der chemischen Nachbehandlung werden Schulterzugstäbe (*PKG_03*), vergleiche Bild 4-7, mit den definierten Betriebspunkten nachbearbeitet und anschließend nach DIN EN ISO 527-1 geprüft. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 8-26 zusammengefasst.

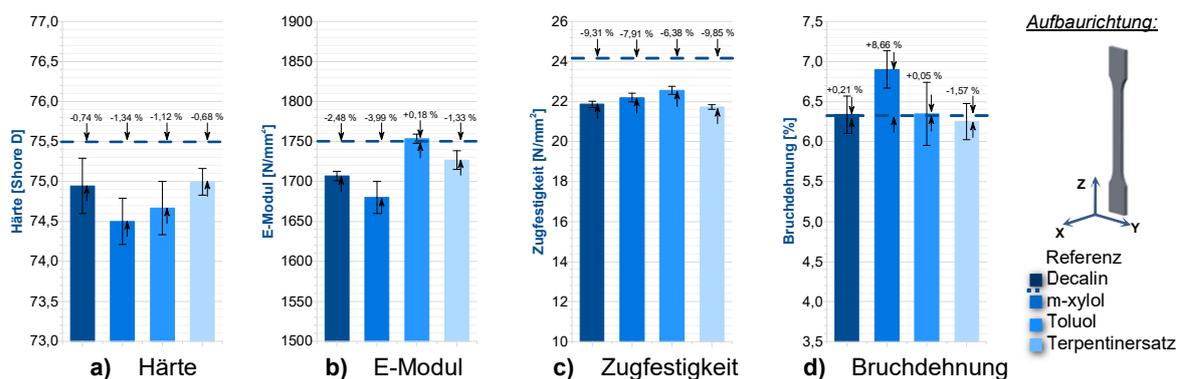


Bild 8-26 - Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch ausgewählte Wirkmedien

Auf Grund der zwischenmolekularen Nebenvalenzbindungen sind die Zwischenräume der Molekülketten bei Polymeren so groß, dass die vergleichsweise kleinen Gas- und Flüssigkeitsmoleküle leicht in diese Zwischenräume eindiffundieren können. Somit erfolgt die Beeinflussung des Wirkmediums praktisch im gesamten Volumen des Kunststoffes und ist nicht nur auf seine Oberflächen beschränkt. Die Moleküle des Wirkmediums umschließen die Makromoleküle des Kunststoffes, so dass eine Vergrößerung des Molekülabstandes und damit verbunden eine Schwächung der Bindungsenergie die Folge ist. Dies wiederum führt zu einer Erhöhung der Molekülbewegung und zu größeren Zwischenräumen, die das Eindringen des Wirkmediums erleichtern. Die Folge ist eine Abnahme sowohl der Härte bei allen betrachteten Wirkmedien um maximal 1,34 % als auch des E-Modul um 3,99 % und der Zugfestigkeit um bis zu 9,31 %. Das Medium Toluol beeinflusst die genannten Größen dabei zunächst am wenigsten. Demnach zeigt der Kunststoff zunächst nur geringfügige Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Zustand auf. Die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften lässt sich hier durch das Herauslösen der Weichmacher und Zusatzstoffe erklären. Die Vergrößerung des Molekülabstandes und damit verbundene Erweichung resultiert in einer Zunahme der Bruchdehnung besonders bei m-Xylol bis zu 8,66 %.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Erhöhte Wettbewerbsdynamiken und damit verbundene Verkürzungen der Produktlebenszyklen, eine steigende Variantenvielfalt und nicht zuletzt die Individualisierung der Produktlandschaft setzen den Einsatz neuer, flexibler Fertigungstechnologien voraus. Dabei geraten die additiven Fertigungsverfahren durch die wirtschaftliche Bauteilherstellung mit nahezu beliebigen Gestaltungsfreiheiten immer mehr in den Fokus. Neben der Technologie des Laser-Strahlschmelzens gilt besonders das Laser-Sintern auf Grund der guten Materialeigenschaften sowie der Einhaltung der geometrischen Produktspezifikationen als zukunftsträchtiges Verfahren für die wirtschaftliche Fertigung von Kunststoffbauteilen im Kleinserienbereich. Dabei beschränkt sich die Fertigung lasergesinterter Bauteile nach heutigem Stand der Technik auf wenige Werkstoffe, welche auf dem Gesamtweltmarkt keinen signifikanten Stellenwert einnehmen. Vorfälle wie der Schadensfall im Chemiepark Marl im Jahr 2012 und der daraus resultierenden Rohstoffverknappung, aber auch die immer steigenden Anforderungen an die Produkteigenschaften durch die Erschließung neuer Anwendungsfelder, lassen die Defizite des Laser-Sinterns immer deutlicher werden.

Zur Abbildung des Marktbedarfes im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde der neuartige teilkristalline Laser-Sinterwerkstoff *Sinterplast*[®] *PP* herangezogen und auf Basis eines definierten Anforderungsprofils qualifiziert. In den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine prinzipielle Verarbeitung des Werkstoffes Polypropylen möglich ist. Durch die Erfassung verarbeitungskritischer Kennwerte durch DSC-Analysen sowie MVR-Messungen wurde erfolgreich ein geeignetes Prozessfenster definiert. Unter Verwendung der statistischen Versuchsplanung wurden erfolgreich potentielle Prozesseinflussgrößen für die Verarbeitung des Werkstoffes Polypropylen mit Hilfe des Laser-Sinter-Prozesses analysiert. Diese wurden innerhalb der modellgestützten Optimierung unter dem Aspekt der Sicherung sowohl von mechanischen Produkteigenschaften als auch geometrischer Produktspezifikationen weiter untersucht. Genauer erfolgte die Identifikation der Haupteinflussgrößen auf ausgewählte Produkteigenschaften wie die Oberflächenbeschaffenheit, die mechanischen Eigenschaften sowie die Form- und Maßhaltigkeit. Die im Zuge modellgestützter Optimierung aufgestellten Regressionsgleichungen belegen dabei die Komplexität des Laser-Sinterprozesses. So sind die Zielgrößen sowohl von linearen Einstellfaktoren als auch von Wechselwirkungseffekten beeinflusst. Der Prozess ist durch nicht-lineare Zusammenhänge geprägt. Darüber ermöglichen die aufgestellten Regressionsanalysen zum einen die Vorhersage der Bauteileigenschaften und zum anderen die gesamtheitliche Optimierung der Prozessparameter zur Gewährleistung sowohl mechanischer als auch geometrischer Produktspezifikationen.

Im Zuge der Untersuchungen konnte ein anisotropes Werkstoffverhalten lasergesinterter Bauteile nachgewiesen werden. So haben sich maximale Abweichungen von 15,38 % identifizieren lassen. Auf dieser Grundlage wurde das Materialverhalten als transversal isotrop klassifiziert und innerhalb der Finite-Elemente-Methode erfolgreich ein linearelastisches Materialmodell erstellt und validiert. In erster Instanz wird durch die Beschreibung des linear-elastischen Verhaltens bereits ein Großteil der in den Ingenieurwissenschaften be-

deutsamen Berechnungen abgedeckt. Bei Bedarf kann dieses um Module, welche das zeitabhängige und irreversible viskose sowie das zeitabhängige, reversible viskoelastische Verformungsverhalten beschreiben, erweitert werden. Damit bietet sich aus wirtschaftlicher Sicht zum einen die Möglichkeit, schon vor der Modellaufbereitung iterativ Maßnahmen zur Erfüllung der Bauteilanforderungen durchzuführen, zum anderen kann durch die Abbildung potentieller Lastzustände und damit verbundene Sicherung eine Vertrauensbasis geschaffen werden, welche mittelfristig die Akzeptanz dieser relativ neuen Technologie erhöht.

Neben den mechanischen Eigenschaften zeigt auch die Oberflächenbeschaffenheit eine signifikante Abhängigkeit von der gewählten Fertigungsorientierung des Bauteils. So streut diese trotz prozesseitiger Optimierung in Abhängigkeit von der Oberflächenorientierung in den Grenzen $Rz_{0^\circ} = 83,55 \mu\text{m}$ und $Rz_{165^\circ} = 163,71 \mu\text{m}$. Der im Zuge der modellgestützten Optimierung identifizierte Parametersatz optimiert nur präferierte Flächenorientierungen, für weitere Orientierungen stellen sich alternative Belichtungseinstellungen als geeigneter heraus. Aus dieser Erkenntnis heraus wurde eine selektive Belichtungsstrategie erarbeitet, welche es ermöglicht, Bauteiloberflächen in Abhängigkeit ihrer Orientierung individuell anzusteuern und mit separaten Belichtungsparametern zu belegen. Insgesamt konnte die Oberflächengüte lasergesinteter Bauteile aus Polypropylen damit um 9,89 % weiter gesteigert werden. Darüber hinaus wird durch die angepassten Oberflächenrauheiten von $Rz_{0^\circ} = 82,21 \mu\text{m}$ und $Rz_{165^\circ} = 132,12 \mu\text{m}$ die Streuung minimiert und eine gleichmäßigere Oberfläche garantiert.

Trotz prozesseitiger Optimierung sowie angepasster Belichtungsstrategie erscheint die Oberfläche lasergesinteter Bauteile im Gegensatz zu den meisten konventionellen Fertigungsverfahren als sehr rau und verwehrt der Technologie damit den Eintritt in viele Anwendungsfelder. Einen potentiellen Lösungsansatz stellt der Einsatz nachgelagerter autarker Nachbearbeitungsverfahren dar. In den folgenden Untersuchungen wurden diese daher zunächst in die mechanisch, thermisch, chemisch abtragenden und die Beschichtungsverfahren klassifiziert und anhand eines definierten Anforderungskataloges bewertet. Es zeigt sich, dass zunächst die der mechanischen Nachbearbeitung untergeordneten Verfahren Festkörperstrahlen sowie Gleitschleifen geeignet sind, die Oberflächengüte unter Einbehaltung der weiteren geometrischen Produktspezifikationen signifikant zu optimieren. Allerdings schließt die Problematik der geometrischen Herausforderungen eine mechanische Bearbeitung längerfristig aus. Daher wurde im weiteren Verlauf die chemische Nachbehandlung qualifiziert, da lasergesinterte Bauteile beim Eintauchen homogen durch das Wirkmedium umschlossen und somit nicht durch die Bauteilkomplexität restriktiert werden. Bedingt durch die allgemeine hohe chemische Beständigkeit des Werkstoffs Polypropylen bestand die große Herausforderung in der Findung geeigneter Wirkmedien, hier wurde auf den Hanse'schen Löslichkeitsparameter zurückgegriffen und die Auswahl anhand einer definierten Vorgehensweise auf vier Wirkmedien eingeschränkt. Innerhalb der weiterführenden Analysen hat sich das Wirkmedium Toluol als geeignet herausgestellt, die Oberflächengüte unter Einbehaltung der weiteren geometrischen Produktspezifikationen und der mechanischen Eigenschaften maßgeblich zu verbessern. Somit konnte diese um weitere 60,91 % gesenkt werden, so dass sich die Oberflächengüte reproduzierbar in den Grenzen $Rz_{0^\circ} = 32,13 \mu\text{m}$ und $Rz_{165^\circ} = 51,64 \mu\text{m}$ einstellen lässt.

Darüber hinaus werfen die im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit durchgeführten Untersuchungen durchaus weitere Fragestellungen für zukünftige Forschungen auf. Im Bereich der Materialqualifizierung bietet das definierte Konzept zur Charakterisierung und Prozessoptimierung einen Weg, weitere dringend benötigte Materialien innerhalb des Laser-Sinterns zu qualifizieren. Hier sei herauszustellen, dass der prozesseitigen Optimierung der Bauteileigenschaften Grenzen gesetzt sind. Alternativen finden sich zu allererst in der Materialmodifikation aber auch in der Definition alternativer Belichtungsstrategien oder

nachgelagerter Folgeprozesse. Die vorgestellte Belichtungsstrategie zeigt dabei die Möglichkeit auf, dass durchaus noch Potential in der Findung eben jener Strategien besteht. Dabei wird hier gezielt die Oberflächengüte als Qualitätsmerkmal herangezogen. Durch angepasste Belichtungen ist es darüber hinaus durchaus denkbar die mechanischen Bauteileigenschaften z. B. in Hinblick auf gradierte Werkstoffeigenschaften zu beeinflussen.

Bei der Abbildung des Werkstoffverhaltens lasergesinterter Bauteile aus Polypropylen durch die Finite-Elemente-Methode ist es gelungen ein gültiges Materialmodell zu entwickeln, welches in zukünftigen Ansätzen durch geringen Versuchsaufwand auf weitere Laser-Sinterwerkstoffe überführt werden kann. Allerdings beschränkt sich das Materialmodell bisher lediglich auf das rein elastische Formverhalten. Auch wenn hier weite Teile der Anwendungen abgedeckt werden, ist die Ausweitung auf das plastische Verformungsverhalten und damit weiterführend auf dynamische Belastungen unter definierten variierenden Umwelteinflüssen notwendig.

Abschließend wurde eine erfolgreiche Strategie vorgestellt, um die Findung potentieller Wirkmedien für weitere Laser-Sinterwerkstoffe voranzutreiben - allen voran die chemische Nachbearbeitung durch abgestimmte Wirkmedien. Auch hier bietet die beschriebene Vorgehensweise durchaus die Möglichkeit, die chemische Nachbehandlung auf andere Werkstoffe zu überführen.

10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Gebhardt, A.:** *Generative Fertigungsverfahren. Rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing.* Hanser, München; 2007.
- [2] **Zäh, M.; Hagemann, F.:** *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren.* Hanser, München; 2006.
- [3] **Gartner, I.:** *Internetpräsenz der Fa. Gartner, Inc. Internetadresse:* <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515>, 05.08.2015.
- [4] **Handelsblatt:** *Übernahme heizt Hype um 3D-Drucker an. Internetadresse:* <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/it-medien/es-winkt-ein-mega-geschaefteuebernahme-heizt-hype-um-3d-drucker-an/8381832.html>.
- [5] **Witt, G.; Seht, J.; Ambrosy J.; Grimm, T.; Wegner, A.:** *DO IT YOURSELF 2.0: Jetzt aber wirklich selbst!? Bedeutung der generativen Fertigungsverfahren für die Produktion von morgen: Stand der Technik, Chancen und Risiken.* In *Industrie Management*; 2013.
- [6] **Lindner, R.:** *Der Star-Trek-Replikator wird Realität. Internetadresse:* <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/3d-drucker-der-star-trek-replikator-wird-realitaet-12102690.html>.
- [7] **Frankfurter Rundschau:** *3D-Drucker zwischen Spaß und Geschäftsmodell. Internetadresse:* <http://www.fr-online.de/digital/3d-drucker-zwischen-spass-und-geschaeftsmodell,1472406,22023744.html>.
- [8] **Wohlers, T. T.:** *Wohlers report 2013. Additive manufacturing and 3D printing state of the industry annual worldwide progress report.*
- [9] **Amado, A.; Schmid, M.:** *Advances in SLS powder characterization.* In *Solid Free-Form Fabrication Symposium*; 2011.
- [10] **Kaiser, W.:** *Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung.* Hanser, München; 2011.
- [11] **Abts, G.:** *Kunststoff-Wissen für Einsteiger.* Carl Hanser Verlag, München; 2010.
- [12] **Evonik Industries AG:** *Pressemitteilung. Brand in der CDT-Anlage im Chemie-park Marl. Internetadresse:* <http://corporate.evonik.de/de/presse/pressearchiv/pages/news-details.aspx?newsid=26362>, 05.08.2015.
- [13] **Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.:** *Generative Fertigung mit Kunststoffen.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg; 2013.
- [14] **Hull, C. W.:** *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.* US4575330 A; 1984.
- [15] **Rietzel, D.:** *Werkstoffverhalten und Prozessanalyse beim Laser-Sintern von Thermoplasten.* Dissertation, Erlangen; 2011.
- [16] **Deutsches Institut für Normung:** *Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung.* DIN 8580, Berlin; 2003.
- [17] **Burns, M.:** *Automated fabrication. Improving productivity in manufacturing.* PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J; 1993.
- [18] **Kulkarni, P.:** *A review of process planning techniques in layered manufacturing.* In *Rapid Prototyping Journal*, S. 18–35; 2000.

- [19] **Verein Deutscher Ingenieure:** *Additive Fertigungsverfahren Strahlschmelzen metallischer Bauteile Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung.* VDI 3405; 2013.
- [20] **Verein Deutscher Ingenieure:** *Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen.* VDI 3404, Berlin; 2009.
- [21] **Wohlers, T. T.:** *Wohlers report 2006. Rapid prototyping & manufacturing state of the industry, annual worldwide progress report.* Wohlers Associates, Fort Collins, Colo; 2006.
- [22] **Sauer, A.:** *Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermop.* Dissertation, Duisburg; 2005.
- [23] **Alscher, G.:** *Das Verhalten teilkristalliner Thermoplaste beim Lasersintern.* Dissertation. Shaker, Aachen; 2000.
- [24] **Michaeli, W.:** *Einführung in die Kunststoffverarbeitung.* Hanser, München; 2006.
- [25] **Wilkening, C.:** *Lasersintern als Rapid Prototyping-Verfahren. Grenzen und Möglichkeiten.* Dissertation, München; 1997.
- [26] **3D-Systems:** *Materialdatenblatt. CastForm TM PS.* Internetadresse: <http://www.3dsystems.com/>, 05.08.2015.
- [27] **EOS GmbH:** *Materialdatenblatt. PrimeCast 101.* Internetadresse: <http://www.eos.info/>, 05.08.2015.
- [28] **Microfol:** *Materialdatenblatt. Sinterplast PP.* Internetadresse: www.hoerdler.de/files/pdf/Produktdatenblatt-SinterPlast-PP.pdf, 05.08.2015.
- [29] **Deckard, C. R.:** *Selective Laser Sintering.* Dissertation, Austin; 1988.
- [30] **Leite, J. L.; Salmoria, G. V.; Paggi, R. A.; Ahrens, C. H.; Pouzada, A. S.:** *A Study on Morphological Properties of Laser Sintered Functionally Graded Blends of Amorphous Thermoplastics.* In *International Journal of Materials and Product Technology*, S. 205–221.
- [31] **Michaeli, W.:** *Einführung in die Kunststoffverarbeitung.* Hanser, München u.a; 2006.
- [32] **Blömer, J.; Bertling, J.:** *Kann jeder Werkstoff gedruckt werden? Thermoplastische Werkstoffe für SLS und FDM.* In *IHK Essen, Generative Verfahren (Fraunhofer Umsicht, Obehäusen).*
- [33] **EOS GmbH:** *Materialdatenblatt. PA 2201.* Internetadresse: <http://www.eos.info/>, 05.08.2015.
- [34] **3D-Systems:** *Materialdatenblatt. DuraForm PA.* Internetadresse: <http://www.3dsystems.com/>, 05.08.2015.
- [35] **EOS GmbH:** *Materialdatenblatt. PA 1101.* Internetadresse: <http://www.eos.info/>, 05.08.2015.
- [36] **3D-Systems:** *Materialdatenblatt. DuraForm FLEX.* Internetadresse: <http://www.3dsystems.com/>, 05.08.2015.
- [37] **EOS GmbH:** *Materialdatenblatt. PEEK HP3.* Internetadresse: <http://www.eos.info/>, 05.08.2015.
- [38] **Deckard, C. R.:** *Part generation by layerwise selective sintering.* University of Texas at Austin; 1986.
- [39] **Carl R. Deckard:** *Method and apparatus for producing parts by selective sintering.* US4863538 A; 1989.
- [40] **Verein Deutscher Ingenieure:** *Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen Güteüberwachung.* VDI 3405 Blatt 1, Düsseldorf; 2012.
- [41] **Hopkinson, N.; Hague, R. J. M.; Dickens, P. M.:** *Rapid manufacturing. An industrial revolution for the digital age.* John Wiley, Chichester, England; 2006.

- [42] **Telenko, C.; Seepersad, C.:** *A comparison of the energy efficiency of selective laser sintering and injection molding of nylon parts.* In *Rapid Prototyping Journal*, S. 472–481.
- [43] **Venuvinod, P. K.; Ma, W.:** *Rapid prototyping: Laser-based and Other Technologies.* Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London; 2004.
- [44] **Danjou, S.:** *Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie.* Cuvillier, Göttingen; 2010.
- [45] **ASTM; Developed by Subcommittee: F42.04:** *Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1.* ASTM.
- [46] Internetpräsenz der 3MF Konsortium. Internetadresse: <http://3mf.io/>, 28.10.2015.
- [47] **Cubital, Ltd.:** *Cubital Facet List (CFL) Guide*, Raanana, Israel.
- [48] **Wu, T.; Cheung, Edmund H. M.:** *Enhanced STL.* In *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, S. 1143–1150; 2006.
- [49] **Chua, C. K.; Gan, G. K. Jacob; Tong, M.:** *Interface between CAD and Rapid Prototyping systems. Part 2: LMI - An improved interface.* In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, S. 571–576; 1997.
- [50] **Rock, S. J.; Wozny, M. J.:** *A Flexible File Format for Solid Freeform Fabrication.* In *Proceedings Solid Freeform Fabrication Symposium*, S. 1–12, The University of Texas; 1991.
- [51] **McMains, S. A.; Sèquin, C. H.; Smith, J. P.:** *SIF. A solid interchange format for rapid prototyping.* In *CIRP - Journal of Manufacturing Systems*, S. 29–32; 1999.
- [52] **3D Systems Inc.:** *Stereolithography interface specification*, Valencia, Californien; 1988.
- [53] **Brock Rooney & Associates, Inc.:** *STH. File Format File Description, Version 1.2.*, Birmingham; 1991.
- [54] **Ming, L. W.; Gibson, I.:** *Specification of VRML in Color Rapid Prototyping.* In *International Journal of CAD/CAM*, S. 1–9; 2002.
- [55] **Reed, K.; Harvd, D.; Conry, W.:** *Initial graphics exchange specification (IGES) version 5.0. CAD-CAM Data Exchange*, Technical Center, Fairfax; 1990.
- [56] **Owen:** *STEP: An Introduction.* Information Geometers, Winchester (UK); 1993.
- [57] **Danjou, Stephane; Köhler, P.:** *Bridging the Gap Between CAD and RP. Exigency of Standardized Data Exchange.* In *Proceedings of the 12th European Forum on Rapid Prototyping*; Ecole Centrale Paris, 2008.
- [58] **Szilcási-Nagy, M.; Mátyási, G.:** *Analysis of STL Files.* In *Mathematical and Computer Modeling*, S. 945–960; 2003.
- [59] **Hoffmann, J.:** *Vom Rapid Prototyping bis zur Serienproduktion.* In *Maschinenmarkt*, S. 30–34; 1995.
- [60] **Hamann, B.:** *A data reduction scheme for triangulated surfaces.* In *Computer Aided Geometric Design*, S. 197–214; 1994.
- [61] **Wegner, A.; Witt, G.:** *Einfluss von fehlerhaften STL-Daten auf die Bauteilqualität generativ gefertigter Bauteile.* Gfal, Berlin; 2009.
- [62] **Wang, D.; Goldak, J. A.:** *Correcting topological defects of tessellations.* In *Canadian Conference on Computational Geometry*, S. 50–55; 1996.
- [63] **Darrah, J.; Wielgus, M.:** *A New CAD Model Format for SFF Machines?;* 1990.
- [64] **Hiller, J.; Lipson, H.:** *STL 2.0. A proposal for a universal multi-material additive manufacturing file format*, Austin, Texas; 2009.
- [65] **West, A. P.; Sambu, S. P.; Rosen, D. W.:** *A process planning method for improving build performance in stereolithography.* In *Computer-Aided Design*, S. 65–79; 2001.

- [66] **Bablani, M.; Bagchi, A.:** *Quantification of errors in rapid prototyping processes and determination of preferred orientation of parts.* In Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, S. 319–324; 1995.
- [67] **Kim, H.-C.; Lee, S.-H.:** *Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization.* In Computer-Aided Design, S. 711–725; 2005.
- [68] **Nezhad, S.; Vatani, M.; Barazandeh, F.; Rahimi, A. R.:** *Determining the optimal build directions in layered manufacturing.* In WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS; 2009.
- [69] **Singhai, S. K.; Pandey, A. P.; Nagpal, A. K.:** *Optimum Part Deposition Orientation in Stereolithography.* In International Journal of Machine Tools and Manufacture, S. 585–594; 2004.
- [70] **Ahn, D.; Kim, H.; Lee, S.:** *Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing.* In International Journal of Machine Tools and Manufacture, S. 593–606; 2007.
- [71] **Lan, P.; Chou, S.; Chen, L.; Gemmill, D.:** *Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus.* In Computer-Aided Design, S. 53–62; 1997.
- [72] **Lin, F.; Sun, W.; Yan Yongnian:** *Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication.* In Rapid Prototyping Journal, S. 73–81; 2001.
- [73] **Frank, D.; Fadel, G.:** *Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes.* In Journal of Intelligent Manufacturing, S. 339–345; 1995.
- [74] **West, A. P.; Sambu, S. P.; Rosen, D. W.:** *A process planning method for improving build performance in stereolithography.* In Computer-Aided Design, S. 65–79; 2001.
- [75] **Goodridge, R. D.; Tuck, C. J.; Hague, R.:** *Laser sintering of polyamides and other polymers.* In Progress in Materials Science, S. 229–267; 2012.
- [76] **Wegner, A.; Witt, G.:** *Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen,* RTEjournal; 2013.
- [77] **Dolenc, A.; Mäkelä, I.:** *Slicing procedures for layered manufacturing techniques.* In Computer-Aided Design, S. 119–126; 1994.
- [78] **Huang, B.; Singamneni, S.:** *Alternate slicing and deposition strategies for fused deposition modelling of light curved parts.* In Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, S. 511–517; 2012.
- [79] **Rock, S. J.; Wozny, M. J.:** *Utilizing Topological Information to Increase Scan Vector Generation Efficiency ing Topological Information to Inc Scan Vector Generation Efficiency;* 1991.
- [80] **Guduri, S.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.:** *A Method to Generate Exact Contour Files for Solid Freeform Fabrication.* In Solid Freeform Fabrication Symposium, S. 95–101.
- [81] **Guduri, S.; Crawford, R. H.; Beaman, J. J.:** *Direct Generation of Contour Files from Constructive Solid Geometry Representations.* In Solid Freeform Fabrication Symposium, S. 291–302; 1993.
- [82] **Farouki, R. T.; König, T.:** *Computational methods for rapid prototyping of analytic solid models.* In Rapid Prototyping Journal, S. 41–49; 1996.
- [83] **Rajagopalan, M.; Aziz, N. M.; Huey, C. O. Jr:** *A model for interfacing geometric modeling data with rapid prototyping systems.* In Advances in Engineering Software, S. 89–93; 1995.

- [84] **Vuyyuru, P.; Kirschman, C. F.; Fadel, G.; Bagchi, A.; Jara-Almonte, C. C.:** *A NURBS-based approach for rapid product realization. In Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping*, S. 229–239; 1994.
- [85] **Rajan, D. S.; Luo, R. C.:** *Cad Model Slicing And Surface Smoothing For Building Rapid Prototyping Parts - Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22. In IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, S. 1496–1501; 1996.
- [86] **Di Qi; Zeng, L.; Yuen, M. M.:** *Robust Slicing Procedure based on Surfel-Grid. In Computer-Aided Design & Applications*; 2013.
- [87] **Luo, R. C.; Ma, Y.:** *A Slicing Algorithm for Rapid Prototyping and Manufacturing - Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 2841–2846; 1995.
- [88] **Liu, G. H.; Wong, Y. S.; Zhang, Y. F.; Loh, H. T.:** *Error-based segmentation of cloud data for direct rapid prototyping. In Computer-Aided Design*, S. 633–645; 2003.
- [89] **Lee, K. H.; Woo, H.:** *Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping. In Computers & Industrial Engineering*, S. 21–38; 2000.
- [90] **Sabourin, E.; House, S.; Bohn, J.:** *Stepwise Uniform Refinement*; 1996.
- [91] **Sabourin, E.; House, S.; Bohn, J.:** *Accurate exterior, fast interior layered manufacturing*; 1997.
- [92] **Tyberg, J.; Bohn J.:** *Local Adaptive Slicing*; 1998.
- [93] **Tata, K.; Fadel G.:** *Efficient slicing for layered manufacturing*; 1998.
- [94] **Cornier, D.; Unnanon, K.; Sanii, E.:** *Specifying non-uniform cusp heights as a potential aid for adaptive slicing. In Rapid Prototyping Journal Volume 6*, S. 204–211; 2000.
- [95] **Jamieson, R.; Hacker, H.:** *Direct slicing of CAD models for rapid prototyping. In Rapid Prototyping Journal Volume 1*, S. 4–12; 1996.
- [96] **Zhao, Z.; Laperrière, L.:** *Adaptive Direct Slicing of the Solid Model for Rapid Prototyping. In International Journal of Production Research*; 2000.
- [97] **Liao, Y.-S.; Chiu, Y.-Y.:** *A New Slicing Procedure for Rapid Prototyping Systems. In Advanced Manufacturing Technology*; 2001.
- [98] **Chen, X.; Wang, C.; Ye, X.; Xiao, Y.; Huang, S.:** *Direct Slicing from PowerSHAPE Models for Rapid Prototyping. In International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, S. 543–547; 2001.
- [99] **Sun, S. H.; Chiang, H. W.; Lee, M. I.:** *Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping. In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, S. 689–701; 2007.
- [100] **Koc, B.:** *Computational geometric analysis and planning for 3D rapid prototyping processes. Dissertation, North Carolina State University*; 2001.
- [101] **Suh, Y. S.; Wozny, M. J.:** *Adaptive Slicing of Solid Freeform Fabrication Processes. In Solid Freeform Fabrication Symposium*; 1994.
- [102] **Kulkarni, P.; Dutta, D.:** *An accurate slicing procedure for layered manufacturing. In Computer-Aided Design*, S. 683–697; 1996.
- [103] **Hope, R.; Roth, R.; Jacobs, P.:** *Adaptive slicing with sloping layer surfaces. In Rapid Prototyping Journal Volume 3*, S. 89–98; 1997.
- [104] **Xu, F.; Wong, Y. S.; Loh, H. T.; Fuh, J.; Miyazawa, T.:** *Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. In Rapid Prototyping Journal Volume 3*, S. 76–88; 1997.
- [105] **Lee, K.; Choi K.:** *Generating Optimal Slice Data for Layered Manufacturing. In Advanced Manufacturing Technology*; 2000.

- [106] **Mani, K.; Kulkarni, P.; Dutta, D.:** *Region-based adaptive slicing. In Computer-Aided Design*, S. 317–333; 1999.
- [107] **Kumar, M.; Choudhury, A. R.:** *Adaptive slicing with cubic patch approximation. In Rapid Prototyping Journal*, S. 224–232; 2002.
- [108] **Kumar, C.; Choudhury, R.:** *Volume deviation in direct slicing. In Rapid Prototyping Journal Volume 3*, S. 174–184; 2005.
- [109] **Pandey, P. M.; Reddy, N. V.; Dhande, S. G.:** *Slicing procedures in layered manufacturing: a review. In Rapid Prototyping Journal*, S. 274–288; 2003.
- [110] **Leondes, C. T.:** *Database and data communication network systems. Techniques and applications. Academic Press, Amsterdam, Boston; 2002.*
- [111] **Forwiss:** *COMMON LAYER INTERFACE (CLI). Internetadresse: https://www.forwiss.uni-passau.de/~welisch/papers/cli_format.html, 05.08.2015.*
- [112] **Loeng, K. F.; Chua, C. K.:** *A study of stereolithography file errors and repair. Part 1. Generic solution. In Advanced Manufacturing Technology*, S. 407–414; 1996.
- [113] **Kaddar, W.:** *Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern - Scanstrategien, Einflüsse und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten. Dissertation, Duisburg; 2010.*
- [114] **Blattmeier, M.:** *Strukturanalyse von lasergesinterten Schichtverbunden mit werkstoffmechanischen Methoden. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden; 2012.*
- [115] **EOS GmbH:** *Schulungsdokumentation FORMIGA P 100. Ausgabe 11.07, 05.08.2015.*
- [116] **Dotchev, K.; Yusoff, W.:** *Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process. In Rapid Prototyping Journal*, S. 192–203; 2009.
- [117] **Seul, T.:** *Ansätze zur Werkstoffoptimierung beim Lasersintern durch Charakterisierung und Modifizierung grenzflächenenergetischer Phänomene. Dissertation, Aachen; 2003.*
- [118] **Grießbach, S.:** *Korrelation zwischen Materialzusammensetzung, Herstellungsbedingungen und Eigenschaftsprofil von lasergesinterten Polyamid-Werkstoffen. Verl. Wissenschaftliche Scripten, Auerbach; 2012.*
- [119] **Pham, D. T.; Dotchev, K. D.; Yusoff, W A Y:** *Deterioration of polyamide powder properties in the laser sintering process. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, S. 2163–2176; 2008.
- [120] **Gornet, T. J.; Davis, K. R.; Starr, T. L.; Mulloy, K. M.:** *Characterization of selective laser sintering materials to determine process stability. In Proceedings of the 12th European Forum on Rapid Prototyping; 2002.*
- [121] **Drummer, D.; Kühnlein, F.; Rietzel, D.; Hüdler, G.:** *Untersuchung der Materialalterung bei pulverbasierten Schichtbauverfahren. In RTejournal - Forum für Rapid Technologie; 2010.*
- [122] **Halder, T.; Perret, H.:** *Vorrichtung zum schichtweisen Herstellen eines dreidimensionalen Objekts. DE102006055075 A1; 2008.*
- [123] **Reichle, J.; Langer, H.:** *Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts. DE4308189 C2; 1998.*
- [124] **Pfister, A.:** *Neue Materialsysteme für das Dreidimensionale Drucken und das Selektive Lasersintern. Dissertation, Freiburg; 2005.*
- [125] **Stieß, M.:** *Mechanische Verfahrenstechnik- Partikeltechnologie 1. Springer, Berlin; 2009.*
- [126] **Wegner, A.:** *Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten. Dissertation, Duisburg; 2014.*
- [127] **Poprawe, R.:** *Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Springer, Berlin; 2005.*

- [128] **Nelson, J.:** *A Definition of the Process and an Empirical Sintering Model*. Dissertation, Austin; 1993.
- [129] **Meiners, W.:** *Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe*. Dissertation, Aachen; 1999.
- [130] **Forderhase, P. F.; McAlea, K.; Michalewicz, M.; Ganninger, M. E.; Firestone, K.:** *SLS Prototypes from nylon*. In Proceedings of the Solid Freeform Fabrication, S. 102–109; 1994.
- [131] **Steinberger, J.:** *Optimierung des Selektiven-Laser-Sinterns zur Herstellung von Feingußteilen für die Luftfahrtindustrie*. VDI-Verl., Düsseldorf; 2001.
- [132] **Grimm, T.; Wegner, A.; Witt, G.:** *Improvement of the Reproducibility of Laser Sintered Polyamide 12 Parts by Establishment of Robust Processing Conditions using Propagation of Error Method*. In Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference; 2014.
- [133] **Reinhardt, T.:** *Experimental analysis of the laser-sintering process from an energetic point of view*. In 23rd DAAAM International Symposium, S. 405–408; 2012.
- [134] **Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.:** *Einführung in die Fertigungstechnik*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden; 2010.
- [135] **Bohnet, J.; Greta, B.; Martin, M.:** *Bessere Oberflächen auf Rapid Prototyping-Werkstücken. Verminderung der Baustufenstruktur auf lasergesinterten Rapid Prototyping-Bauteilen mittels Strahlverfahren*. In Galvanotechnik, S. 1884–1891; 2008.
- [136] **Schmid, M.; Levy, G.:** *Finishing und Coating von SLS-Teilen für Additive Manufacturing (AM)*. In RTEJournal; 2010.
- [137] **Bohnet, J.:** *Oberflächenveredelung von generativen Werkstücken*. In 13. Anwenderforum Rapid Product Development; 2008.
- [138] **Galantucci, L. M.; Lavecchia, F.; Percoco, G.:** *Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts*. In CIRP Annals - Manufacturing Technology, S. 189–192; 2009.
- [139] **Galantucci, L. M.; Lavecchia, F.; Percoco, G.:** *Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling*. In CIRP Annals - Manufacturing Technology, S. 247–250; 2010.
- [140] **Rao, A. S.; Dharap, M. A.; Venkatesh, J. V. L.; Ojha, D.:** *Investigation of postprocessing techniques to reduce the surface roughness of fused deposition modeled parts*. In International Journal of Mechanical Engineering and Technology, S. 531–544; 2012.
- [141] **Schmid, M.; Simon, C.; Levy, G.:** *Finishing of SLS-parts for rapid manufacturing (RM). a comprehensive approach*. In Solid Freeform Fabrication Symposium; 2009.
- [142] **Mistree, F.; Panchal, J., H.; Schaefer, D.:** *Pathways to supply chain excellence. From Personalized Products to Personalized Engineering Education*. InTech, Rijeka; 2012.
- [143] **Stommel, M.; Stojek, M.; Korte, W.:** *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. Hanser, München; 2011.
- [144] **Weissman, E.; Hsu, M. B.:** *A Finite Element Model of Multi-Layered Laser Sintered Parts*. In Solid Freeform Fabrication Symposium, S. 86–94; 1991.
- [145] **Franco, A.; Lanzetta, M.:** *Experimental analysis of selective laser sintering of polyamide powders: an energy perspective*. In Journal of Cleaner Production, S. 1722–1730; 2010.
- [146] **Nelson, J.:** *Model of the Selective Laser Sintering of Bisphenol-A Polycarbonate*. In American Chemical Society; 1993.
- [147] **Schultz, J.:** *Modeling Heat Transfer and Densification during Laser Sintering of Viscoelastic Polymers*. Dissertation, Virginia; 2003.

- [148] **Williams, D.; Deckard, C.:** *Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. In Rapid Prototyping Journal Volume 4, S. 90–100; 1998.*
- [149] **Kholpov, L.; Zakiev E.:** *Modeling of thermal processes in laser sintering of reactive powder compositions. In Journal of Engineering Physics and Thermophysics; 2005.*
- [150] **Bugeda, G.; Cervera, M.:** *Numerical prediction of temperature and density distributions in selective laser sintering processes. In Rapid Prototyping Journal Volume 5, S. 21–26; 1999.*
- [151] **Bai, P.; Cheng, J.; Liu, B.; Wang, W.:** *Numerical simulation of temperature field during selective laser sintering of polymer-coated molybdenum powder. In Transactions of Nonferrous Metals Society of China, S. 603–607; 2006.*
- [152] **Childs, T.; Berzins, M.:** *Selective laser sintering of an amorphous polymer—simulations and experiments. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, S. 333–349; 1999.*
- [153] **Childs, T.; Hauser, C.; Taylor, C.; Tontowi, A.:** *Simulation and Experimental Verification of Crystalline Polymer and direct metal selective laser sintering. In Solid Freeform Fabrication Symposium; 2000.*
- [154] **Dong, L.; Makradi, A.; Ahzi, S.:** *Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process. In Journal of Materials Processing Technology, S. 700–706; 2008.*
- [155] **Liu, F.; Zhang, Q.:** *Micro scale 3D FEM simulation on thermal evolution within the porous structure in selective laser sintering. In Journal of Materials Processing Technology, S. 2058–2065; 2012.*
- [156] **Kolossov, S.; Boillat, E.:** *FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process. In Int. J. Mach. Tools Manuf. 44., S. 117–123; 2004.*
- [157] **Ajoku, U.; Hopkinson, N.; Caine, M.:** *Experimental measurement and finite element modelling of the compressive properties of laser sintered Nylon-12. In Materials Science and Engineering, S. 211–216; 2006.*
- [158] **Eshraghi, S.; Das, S.:** *Micromechanical finite-element modeling and experimental characterization of the compressive mechanical properties of polycaprolactone-hydroxyapatite composite scaffolds prepared by selective laser sintering for bone tissue engineering. In Acta biomaterialia, S. 3138–3143; 2012.*
- [159] **Soe, S. P.; Martindale, N.; Constantinou, C.; Robinson, M.:** *Mechanical characterisation of Duraform® Flex for FEA hyperelastic material modelling. In Polymer Testing, S. 103–112; 2014.*
- [160] **Tumer, I., Y.; Thompson, D., C.; Wood, K., L.; Craford, R., H.:** *Characterization of Surface Fault Patterns with Application to a Layered Manufacturing Process. In Journal of Manufacturing Systems, S. 23–26; 1998.*
- [161] **Reddy, J. T.; Kumar, Y.; Rao, C., S.:** *Determination of optimum process parameters using taguchi's approach to improve the quality of SLS parts. In Proceedings of the 17th IASTED International Conference on Modelling and Simulation, S. 288–233; 2006.*
- [162] **Bacchewar, P. B.; Singhal, S. K.; Pandey, P. M.:** *Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, S. 35–52; 2007.*
- [163] **Srivastava, V.; Parida, S., K.; Pandey, P. M.; Hinduja, S.; Li, L.:** *Surface Roughness Studies in Selective Laser Sintering of Glass filled Polyamide. In Proceedings of the 36th International MATADOR Conference; 2010.*

- [164] **Wegner, A.; Witt, G.:** *Influencing Factors on Surface Roughness in Laser Sintering and Their Effect on Process Speed.* In Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference; 2012.
- [165] **Pham, D. T.; Dotchev, K. D.; Yusoff, W A Y:** *Improvement of part surface finishing in laser sintering by experimental design optimisation (DOE).* In Journal of Intelligent Manufacturing, S. 675–691; 2011.
- [166] **Sachdeva, A.; Singh, S.; Sharma, V. S.:** *Investigating surface roughness of parts produced by SLS process.* In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, S. 1505–1516; 2013.
- [167] **Kim, G. D.; Oh, Y. T.:** *A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost.* In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, S. 201–215; 2008.
- [168] **Wang, X.:** *Calibration of shrinkage and beam offset in SLS process.* In Rapid, S. 129–133; 1999.
- [169] **Wegner, A.; Witt, G.:** *RM-gerechte Auslegung funktionaler Bauteile für das Laser-sintern.* In Rapid.Tech; 2010.
- [170] **Nelson, C.; McAlea, K.; Gray, G.:** *Improvements in SLS Part Accuracy.* In Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium; 1995.
- [171] **Niino, T.; Morita, K.:** *Improvement in Geometrical Resolution of Plastic Laser Sintering by using Reduced Spot Sized Laser.* In Solid Freeform Fabrication Symposium; 2010.
- [172] **Yang, H. J.; Hwang, P. J.; Lee, S. H.:** *A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method.* In International Journal of Machine Tools & Manufacture, S. 1203–1212; 2002.
- [173] **Ragunath, N.; Pandey, P. M.:** *Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering.* In International Journal of Machine Tools and Manufacture, S. 985–995; 2007.
- [174] **Senthilkumaran, K.; Pandey, P. M.; Rao, P.:** *Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering.* In Materials & Design, S. 2946–2954; 2009.
- [175] **Wang, R.; Wang, L.; Zhao, L.; Liu, Z.:** *Influence of process parameters on part shrinkage in SLS.* In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, S. 498–504; 2007.
- [176] **Wang, R.; Li, X.; Wu, Q.; Wang, L.:** *Optimizing process parameters for selective laser sintering based on neural network and genetic algorithm.* In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, S. 1035–1042; 2009.
- [177] **Usher, J. S.; Srinivasan, M. K.:** *Quality improvement of a selective laser sintering process.* In Quality Engineering, S. 161–168; 2000.
- [178] **Becker, R.; Grzesiak, A.; Henning, A.:** *Rethink assembly design.* In Assembly Automation, S. 262–266; 2005.
- [179] **Kruf, W.; van de Vorst, B.; Maalderink, H.; Kamperman, N.:** *Design for rapid manufacturing functional SLS parts.* In 2nd IPROMS Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems; 2006.
- [180] **Tontowi, A. E.:** *Selective laser sintering of crystalline polymers.* Dissertation, Leeds; 2000.
- [181] **Gibson, I.; Shi, D.:** *Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process.* In Rapid Prototyping Journal, S. 129–136; 1997.
- [182] **Beal, V. E.; Paggi, R. A.; Salmoria, G. V.; Lago, A.:** *Statistical evaluation of laser energy density effect on mechanical properties of polyamide parts manufactured*

- by selective laser sintering. In Journal of Applied Polymer Science, S. 2910–2919; 2009.*
- [183] **Wartzack, S. et al.:** *Besonderheiten bei der Auslegung und Gestaltung lasergesintertter Bauteile. In RTEjournal - Forum für Rapid Technologie; 2010.*
- [184] **Ajoku, U.; Saleh, N.; Hopkinson, N.; Hague, R.; Erasenthiran, P.:** *Investigating mechanical anisotropy and end-of-vector effect in laser-sintered nylon parts. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, S. 1077–1086; 2006.*
- [185] **Amado-Becker, A.; Ramos-Grez, J.:** *Elastic tensor stiffness coefficients for SLS Nylon 12 under different degrees of densification as measured by ultrasonic technique. In Rapid Prototyping Journal, S. 260–270; 2008.*
- [186] **Muraru, L.; Pallari, J.; Creylman, V.; Vander Sloten, J.; Peeraer, L.:** *SLS Nylon 12 characterisation through tensile testing and digital image correlation for finite element modelling of foot and ankle-foot orthoses. In International Solid Freeform Fabrication Symposium; 2010.*
- [187] **Pereira, T. F. et al.:** *Effect of process parameters on the properties of selective laser sintered Poly(3-hydroxybutyrate) scaffolds for bone tissue engineering. In Virtual and Physical Prototyping, S. 275–285; 2012.*
- [188] **Budding, A.; Vaneker, T.:** *New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques. In Procedia CIRP, S. 527–532; 2013.*
- [189] **Grießbach, S.; Lach, R.; Grellmann, W.:** *Structure–property correlations of laser sintered nylon 12 for dynamic dye testing of plastic parts. In Polymer Testing, S. 1026–1030; 2010.*
- [190] **Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM):** *Rechnischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. Aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. VDMA Verlag, Frankfurt; 2003.*
- [191] **EOS GmbH:** *Formiga P 100. Internetadresse: <http://www.eos.info/>, 05.08.2015.*
- [192] **Backer, A.; Lehmann, M.; Tremel, M.:** *Ein Compoundeur auf Abwegen. Polypropylenpulver zum Lasersintern. In Kunststoffe International.*
- [193] **Deutsches Institut für Normung:** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Übersicht. DIN 32950, Berlin; 1997.*
- [194] **Deutsches Institut für Normung:** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung. DIN EN ISO 17450-1, Berlin; 2012.*
- [195] **Deutsches Institut für Normung:** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Zur Spezifikation und Prüfung benutzte Geometrielemente. DIN EN ISO 22432, Berlin; 2012.*
- [196] **Deutsches Institut für Normung:** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Merkmale und Bedingungen - Begriffe. DIN EN ISO 25378, Berlin; 2011.*
- [197] **Adobe:** *Adobe Photoshop CS 5 WIN. Internetadresse: <http://www.adobe.com/products/photoshopfamily.html>.*
- [198] **Deutsches Institut für Normung:** *Gestaltabweichungen - Begriffe, Ordnungssystem. DIN 4760, Berlin; 1982.*
- [199] **Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.:** *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. Vieweg + Teubner Verlag; 2013.*
- [200] **Pfeifer, T.; Schmitt, R.:** *Fertigungsmesstechnik. Oldenbourg, München; 2010.*
- [201] **Mitutoyo Messgeräte GmbH:** *Tastschnittgerät SurfTest SJ-402. Internetadresse: <http://www.mitutoyo.co.uk/media/pdf/Form/SJ-400-E4185-178.pdf>, 05.08.2015.*
- [202] **Deutsches Institut für Normung:** *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten. DIN EN ISO 3274, Berlin; 1998.*

- [203] **Deutsches Institut für Normung:** *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern.* DIN EN ISO 11562, Berlin; 1998.
- [204] **Deutsches Institut für Normung:** *Geometrische Prüfspezifikationen (GPS); Oberflächenbeschaffenheit - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.* DIN EN ISO 4288, Berlin; 1998.
- [205] **Sehrt, J.:** *Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren.* Shaker, Aachen; 2010.
- [206] **Deutsches Institut für Normung:** *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.* DIN EN ISO 4287, Berlin; 2010.
- [207] **Deutsches Institut für Normung:** *Werkstückkanten mit unbestimmter Form.* DIN ISO 13715, Berlin; 2000.
- [208] **Distelkamp - Electronic:** *Auflicht- und Durchlicht- Digital-Zoom-Mikroskop mit starker Vergrößerung Di-Li 2004.* Internetadresse: http://www.loetdampf.de/mikroskop_usb.html, 05.08.2015.
- [209] **Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.:** *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe.* Springer Vieweg, Wiesbaden; 2012.
- [210] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1 - Allgemeine Grundsätze.* DIN EN ISO 527-1, Berlin; 1996.
- [211] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2 - Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.* DIN EN ISO 527-2, Berlin; 1996.
- [212] **Deutsches Institut für Normung:** *Vielzweckprobekörper.* DIN EN ISO 3167, Berlin; 2003.
- [213] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung.* DIN EN ISO 291, Berlin; 2008.
- [214] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften – Teil 2: Torsionspendel-Verfahren.* DIN EN ISO 6721-2; 2008.
- [215] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften – Teil 2: Torsionspendel-Verfahren.* DIN EN ISO 6721-1; 2008.
- [216] **Deutsches Institut für Normung:** *Bestimmung der Härte - Teil 2: Rockwellhärte.* DIN EN ISO 2039-2, Berlin; 2000.
- [217] **Deutsches Institut für Normung:** *Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren.* DIN EN ISO 1183-1, Berlin; 2013.
- [218] **Deutsches Institut für Normung:** *Farbmessung - Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung.* DIN 5033-1; 2009.
- [219] **TU Darmstadt:** *Praktische Farbmessung.* Internetadresse: http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/studium_und_lehre/vorlesungen_4/praktische_farbmessung/ss2011_2/prfm_03_farbmessung_030511.pdf.
- [220] **Deutsches Institut für Normung:** *Farbmessung - Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbraum.* DIN EN ISO 11664-4, Berlin; 2012.
- [221] **Deutsches Institut für Normung:** *Graphische Technik - Spektrale Messung und farbmessungsmetrische Berechnung für graphische Objekte.* DIN ISO 13655, Berlin; 2000.
- [222] **Holst, G.:** *Systematisierung der Planungsphase der statistischen Versuchsmethodik für die industrielle Anwendung.* Shaker, Aachen; 1995.
- [223] **Scheffler, E.:** *Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker.* Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Stuttgart; 2001.

- [224] **Kleppmann, W.:** *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren.* Hanser, München; 2013.
- [225] **Nedeß, C.; Holst, G.:** *Hilfen für die statistische Versuchsplanung? Taguchis orthogonale Felder und lineare Graphen, Teil 3.* In QZ 37, S. 202–204; 1992.
- [226] **Bandow, G.; Holzmüller, H. H.:** „Das ist gar kein Modell!“. Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden; 2009.
- [227] **Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.:** *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE).* Springer, Heidelberg; 2010.
- [228] **Klein, B.:** *Versuchsplanung - DoE. Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik.* Oldenbourg, München [u.a.]; 2007.
- [229] **Klostermann, T.:** *Optimierung kooperativer Dienstleistungen im Technischen Kundendienst des Maschinenbaus.* Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden; 2008.
- [230] **Ehrenstein, G. W.; Riedel, G.; Trawiel, P.:** *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen.* Hanser, München; 2003.
- [231] **Rechtenwald, T.:** *Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten. Eine Betrachtung werkstoff- und prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK.* Dissertation, Erlangen; 2011.
- [232] **Barbosa-Cánovas, G. V.:** *Food powders. Physical properties, processing, and functionality.* Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York; 2005.
- [233] **Wegner, A.; Witt, G.:** *Betrachtung zur Pulvernutzungsdauer beim Laser-Sintern und Einfluss der Prozessführung auf die Entstehung von Ausschussbauteilen.* In RTejournal - Forum für Rapid Technologie; 2012.
- [234] **Wilkening, C.:** *Lasersintern als Rapid Prototyping-Verfahren. Grenzen und Möglichkeiten.* Dissertation, München; 1997.
- [235] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen.* DIN EN ISO 11357-1, Berlin; 2010.
- [236] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur und der Glasübergangsstufen.* DIN EN ISO 11357-2, Berlin; 2013.
- [237] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 3: Bestimmung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur und der Schmelz- und Kristallisationsenthalpie,* Berlin; 2013.
- [238] **Deutsches Institut für Normung:** *Kunststoffe – Bestimmung der Schmelze-Masseflussrate (MFR) und der Schmelze-Volumenflussrate (MVR) von Thermoplasten –.* DIN EN ISO 1133-1, Berlin; 2012.
- [239] **Deutsches Institut für Normung:** *Polypropylen (PP) - Formmassen; Teil 1: Bezeichnungssystem und Basis für Spezifikationen.* DIN EN ISO 1893-1, Berlin; 1995.
- [240] **Mielicki, C.:** *Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Lasersintern von Polyamid 12.* Dissertation, Duisburg; 2014.
- [241] **Deutsches Institut für Normung:** *Bewertung der chemischen Widerstandsfähigkeit von Thermoplasten.* DIN 16888, Berlin; 1989.
- [242] **Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S.:** *Beständigkeit von Kunststoffen.* Hanser, München; 2007.
- [243] **Dominghaus, H.:** *Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen.* Springer, Berlin; 2007.
- [244] **Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S.:** *Beständigkeit von Kunststoffen.* Hanser, München; 2007.

- [245] **Koltzenburg, S.; Maskos, M.; Nuyken, O.:** *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*. Springer Spektrum, Berlin [u.a.]; 2014.
- [246] **Meintrup, D.:** *Statistische Versuchsplanung mit JMP. von der Klassik zur Moderne*, Hochschule Ingolstadt; 2012.
- [247] **Sehrt, J. T.; Reinartz, B.; Witt, G.; Deiss, O.; Münzer, J. Ott, M.:** *Optimization of Media Feed Channels in Laser Beam Melting*, Berkley, USA; 2014.
- [248] **Chandrupatla, T. R.; Belegundu, A. D.:** *Finite Elements in Engineering, 3rd ed.* Pearson Education Inc., New Jersey; 2002.
- [249] **Steinke, P.:** *Finite-Elemente-Methode. Rechnergestützte Einführung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg; 2012.
- [250] **Dassault Systemes:** *Analysis User`s Guide - Volume 3. Materials*.
- [251] **Altenbach, H.:** *Kontinuumsmechanik. Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. Springer, Berlin; 2012.
- [252] **Dassault Systemes:** *Analysis User`s Guide - Volume 4. Elements*.
- [253] **Deutsches Institut für Normung:** *Fertigungsverfahren Strahlverfahrenstechnik; Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren*. DIN 8200, Berlin; 1982.
- [254] **Deutsches Institut für Normung:** *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 17: Gleitspanen (Einordnung, Unterteilung, Begriffe)*. DIN 8589-17, Berlin; 2003.
- [255] **Prüller, H.:** *Praxiswissen Gleitschleifen. Leitfaden für die Produktionsplanung und Prozessoptimierung*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden; 2012.
- [256] **Walther Trowal GmbH & Co. KG:** *Internetpräsenz der Fa. Walther Trowal GmbH & Co. KG. Internetadresse: <http://www.walther-trowal.de/>, 05.08.2015.*
- [257] **Klein, S.:** *Injektorkabinen Produktinformationen*.
- [258] **OTEC Präzisionsfinish GmbH:** *Internetpräsenz der Fa. OTEC Präzisionsfinish GmbH. Internetadresse: <http://www.otec.de/index.php>, 05.08.2015.*
- [259] **Rösler Oberflächentechnik GmbH:** *Internetpräsenz der Fa. Rösler Oberflächentechnik GmbH. Internetadresse: <http://www.rosler.info/>, 05.08.2015.*
- [260] **Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.:** *Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen*. Springer, Dordrecht; 2008.
- [261] **Deutsches Institut für Normung:** *Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien - Polymere Werkstoffe*. DIN; 2012.