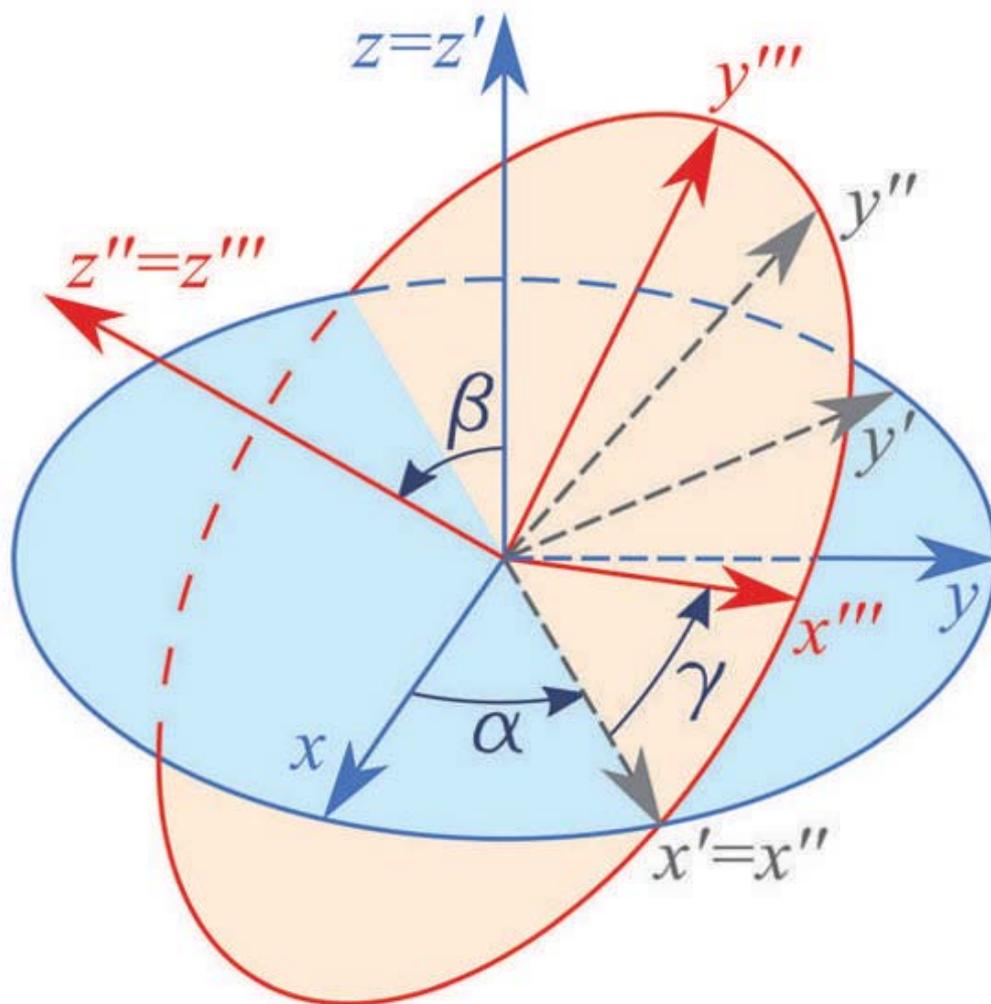


Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie



Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Stéphane Danjou

aus

Versailles (FR)

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote, Universität Magdeburg

Tag der mündlichen Prüfung: 28.09.2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ. Diss., 2010

978-3-86955-534-8

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-534-8

Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Rechnereinsatz in der Konstruktion am Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen in den Jahren von 2004 bis 2010.

In erster Linie danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler für die persönliche Unterstützung, den wissenschaftlichen Freiraum meiner Forschungsarbeit sowie für die hervorragende Betreuung, was zu einem Großteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Des Weiteren danke ich vielmals für die überaus angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit am Institut, sowohl für die Zeit meiner Tätigkeit als studentische Hilfskraft als auch für die Zeit als wissenschaftlicher Assistent.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote, Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik am Institut für Maschinenkonstruktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, danke ich für die Übernahme des Korreferats und das damit entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit.

Des Weiteren danke ich allen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls für Rechnereinsatz in der Konstruktion für die kollegiale Zusammenarbeit in den letzten Jahren. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr.-Ing. Norman Lupa und Herrn Dr.-Ing. Sascha Dungs für die konstruktiven Kritiken und Anmerkungen sowie für die zahlreichen interessanten fachlichen und persönlichen Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, Inhaber des Lehrstuhls Fertigungstechnik am hiesigen Institut, danke ich ebenfalls sehr für den unterstützenden Einsatz und die Hilfestellung auf dem Gebiet der Rapid-Technologie.

Ebenfalls danken möchte ich Frau Dipl.-Ing. Jeannette Heide sowie Herrn Dr.-Ing. Jan Sehrt für ihre fachliche aber auch vor allem persönliche Unterstützung während dieser Zeit. Mit ihnen konnte ich alle Höhen und Tiefen teilen. Herrn Dipl.-Ing. Lutz Kremer und Herrn Dipl.-Jur. Kai Thorsten Radtke danke ich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und den daraus entstandenen konstruktiven Anregungen. Ferner bedanke ich mich bei allen studentischen Hilfskräften für die gute Zusammenarbeit und ihr Engagement.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Freunden und vor allem bei meiner Familie, die mich auch in schwierigen Situationen stets unterstützt hat. Besonders hervorheben möchte ich meine Mutter, die es auf bemerkenswerte Weise stets verstanden hat mich zu motivieren und mir somit den für die erfolgreiche Durchführung meiner Arbeit notwendigen Rückhalt während dieser Zeit gab. Ihr gilt mein größter Dank.

Inhalt

Symbole und Abkürzungen VII

Abbildungen und Tabellen IX

1 Einleitung..... 1

- 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung..... 1
- 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit 2
- 1.3 Gliederung der Arbeit..... 2

2 Grundlagen der Rapid-Technologie 3

- 2.1 Systematik der Technologieanwendungen 4
 - 2.1.1 Rapid Prototyping..... 4
 - 2.1.2 Rapid Manufacturing 4
- 2.2 Die Rapid-Technologie im Produktentstehungsprozess..... 5
 - 2.2.1 Einordnung der GF-Verfahren..... 6
 - 2.2.2 Zukünftige Technologienutzung..... 6
- 2.3 Verfahrensgrundlagen 7
 - 2.3.1 Technologische Prozesskette..... 7
 - 2.3.2 Datentechnische Prozesskette 8
- 2.4 Datenaustausch für Anwendungen der Rapid-Technologie 9
 - 2.4.1 STL 10
 - 2.4.2 Weitere 3D-Schnittstellenformate 11
 - 2.4.3 2¹/₂D-Schichtdatenrepräsentationen 12
- 2.5 Vorbereitung des Bauprozesses 13
 - 2.5.1 Bauteilorientierung 13
 - 2.5.2 Bauraumplanung 14
 - 2.5.3 Supportgenerierung..... 15
 - 2.5.4 Schichtzerlegung 16
 - 2.5.5 Einstellparameter 17
- 2.6 Bauprozess und Post Processing 17

3 Konzeption der Orientierungsoptimierung 19

- 3.1 Potenziale und Grenzen der Rapid-Technologie..... 19
- 3.2 Anforderungen an die Bauteilorientierung..... 23
- 3.3 Konzeptentwurf..... 26

4	Stand der Wissenschaft	29
4.1	Ansätze zur Optimierung des Datentransfers	29
4.1.1	Problemdefinition	29
4.1.2	Weiterentwicklungen des STL-Formats	29
4.1.3	Ansätze zur Erhöhung der Bauteilgenauigkeit.....	30
4.1.4	Ansätze zur Modellierung heterogener Bauteile	31
4.1.5	STEP-basierter Datenaustausch.....	32
4.1.6	Fazit.....	32
4.2	Ansätze zur Optimierung der Bauteilorientierung.....	33
4.2.1	Problemdefinition	33
4.2.2	Geometriebasierte Ansätze	34
4.2.3	Parameterbasierte Ansätze	36
4.2.4	Fazit.....	37
4.3	Ansätze zur Optimierung der Bauraumausnutzung	37
4.3.1	Problemdefinition	38
4.3.2	Hüllkörperbasierte Ansätze.....	39
4.3.3	Objektbasierte Ansätze	41
4.3.4	Weitere Ansätze	41
4.3.5	Fazit.....	41
4.4	Ansätze zur Optimierung der Schichtzerlegung.....	42
4.4.1	Problemdefinition	42
4.4.2	Adaptive Schichtzerlegung	43
4.4.3	Direkte adaptive Schichtzerlegung	46
4.4.4	Fazit.....	47
4.5	Ansätze zur Unterstützung der Prozessvorbereitung	48
4.6	Fazit zum Stand der Wissenschaft.....	48
5	Algorithmen zur Lösung geometrischer Teilprobleme	49
5.1	Anwendung der Algorithmischen Geometrie.....	49
5.1.1	Begriffsdefinitionen	50
5.1.2	Algorithmische Operationen	52
5.1.2.1	Dreieckoperationen.....	52
5.1.2.2	Halbraumtest.....	53
5.1.2.3	Flächeninhalt eines Polygons	54
5.1.2.4	Volumen eines Polyeders.....	55
5.1.2.5	Ebener Schnitt eines Polyeders	56
5.1.2.6	Triangulierung	57
5.1.2.7	Affine Transformation	59
5.1.3	Hüllkörper.....	61
5.1.4	Konvexe Hülle	62
5.1.4.1	Algorithmen zur Berechnung	63
5.1.4.2	Durchmesser	64
5.1.5	Datenstrukturen für Polygonnetze	66

5.1.5.1	Objektnetze.....	66
5.1.5.2	Listenstrukturen.....	66
5.2	Heterogene Objektrepräsentation	68
5.2.1	Segmentierung von Polygonnetzen.....	68
5.2.2	Identifikation von Netzsegmenten	69
5.3	Minimierung des Treppenstufeneffekts.....	71
5.3.1	Konzept des minimalen Volumenfehlers	71
5.3.2	Konzept der minimalen Spitzenhöhe	72
5.4	Minimierung des Verzugs	75
5.5	Optimierung der Stützkonstruktionen.....	76
5.5.1	Kontaktfläche.....	76
5.5.2	Volumen	79
5.5.3	Entfernbarkeit	79
5.5.4	Bauteilstabilität	81
5.6	Minimierung der Fertigungskosten	82
5.7	Optimierung der Bauraumausnutzung	84
5.7.1	Problemdefinition	84
5.7.2	Das Optimierungsmodell.....	84
6	Methodische Umsetzung der Mehrzieloptimierung	87
6.1	Optimierungen	87
6.1.1	Klassifizierung der Optimierungsverfahren	88
6.1.2	Mehrzieloptimierung	89
6.1.2.1	Definition	89
6.1.2.2	Leistungsbewertung von Algorithmen.....	90
6.1.2.3	Bewertung mehrdimensionaler Zielfunktionen.....	90
6.1.3	Evolutionäre Algorithmen.....	91
6.2	Genetischer Algorithmus	93
6.2.1	Terminologie.....	93
6.2.2	Prinzipieller Ablauf.....	95
6.2.3	Codierung	96
6.2.4	Fitnessfunktion.....	97
6.2.5	Abbruchkriterien.....	97
6.2.6	Genetische Operatoren	98
6.2.6.1	Selektion	98
6.2.6.2	Rekombination	100
6.2.6.3	Mutation.....	101
6.2.6.4	Beispiel	101
6.2.6.5	Weitere Evolutionsfaktoren.....	102
6.2.7	Konvergenz.....	102
7	Gesamtkonzept und Realisierung	103
7.1	Technische Implementierung.....	105

7.2	Konfigurierung des genetischen Algorithmus.....	106
7.2.1	Suchraum	106
7.2.2	Codierung.....	106
7.2.3	Anfangspopulation.....	106
7.2.4	Fitnessfunktion.....	107
7.2.5	Genetische Operatoren	107
7.2.6	Abbruchkriterien.....	108
7.3	Datenaufbereitung	108
7.3.1	Speicherung heterogener Objekteigenschaften.....	108
7.3.2	Herstellen der Topologie.....	109
7.3.3	Konvexe Hülle.....	109
7.3.4	Affine Transformation.....	110
7.3.5	Clipping	110
7.4	Integration der umgesetzten Teilkonzepte.....	114
8	Validierung und Evaluierung.....	115
8.1	Visualisierung und Interpretation der Ergebnisse.....	115
8.2	Anwendungsbeispiele	116
8.2.1	Minimierung der Bauhöhe	116
8.2.2	Optimierung der Schichtzerlegung.....	118
8.2.3	Minimierung des Treppenstufeneffekts	119
8.2.4	Minimierung des Verzugs	120
8.2.5	Optimierung der Stützkonstruktionen.....	121
8.2.5.1	Minimierung der Kontaktfläche	121
8.2.5.2	Minimierung des Volumens.....	123
8.2.5.3	Gewährleistung der Entfernbareit	124
8.2.5.4	Gewährleistung der Bauteilstabilität	125
8.2.6	Mehrzieloptimierung der Wirtschaftlichkeit	126
8.2.7	Mehrzieloptimierung der Bauteilqualität	128
8.2.8	Mehrzieloptimierung konträrer Fertigungsziele	130
8.3	Zusammenfassung und Bewertung des Konzepts	133
8.3.1	Bewertung der Algorithmen	133
8.3.2	Bewertung der Optimierungsparameter	134
8.3.3	Bewertung des Konvergenzverlaufs	135
8.3.4	Fazit.....	136
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
	Literatur.....	141
	Anhang.....	153
	Veröffentlichungen	167
	Lebenslauf	169

Symbole und Abkürzungen

Symbole

$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$	Ortsvektoren von Eckpunkten	α, β	Drehwinkel
a_x, a_y, a_z	Vektorkomponenten	γ	Neigungswinkel
A	Flächeninhalt	Δ	Abstand
$CH(Q)$	konvexe Hülle einer Punktmenge	Δ_h	Hamming-Distanz
c	Spitzenhöhe	Φ	Fitnessfunktion
\mathbb{C}	Menge der komplexen Zahlen	Γ	Decodierungsfunktion
d	Durchmesser (Punktmenge)	λ	Anzahl der Kinder (Population)
e	Kante (Edge)	μ	Anzahl der Eltern (Population)
E	Ebene	O	Landau-Symbol, obere Schranke
f	Facette (Face), Untersimplex	Ω	Landau-Symbol, untere Schranke
f_i	partielle Zielfunktion	ξ	beliebiges/bestes Individuum
F	Gesamtzielfunktion	η, ν	Verhältniszahl
g	Generation		
I	Individuum		
k	Dimension		
K	Teilmenge aus \mathbb{R}		
\mathbf{n}	Normalenvektor		
n	Anzahl, Populationsgröße		
m	Anzahl		
\mathbf{p}	Ortsvektor eines Dreieckspunkts		
p	Punkt, (Pareto-)Lösung		
P	Polytop (Polygon, Polyeder)		
p_c	Crossover-Wahrscheinlichkeit		
p_m	Mutationswahrscheinlichkeit		
p_s	Selektionswahrscheinlichkeit		
q	bel. Punkt, Quaternion		
Q	bel. Punktmenge		
r	Gütwert (Rating)		
R	Raum, Suchraum		
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen		
S	Simplex		
t	Schichtdicke		
T	Dreieck, Tetraeder		
v	Eckpunkt (Vertex)		
V	Volumen		
w	Gewichtungsfaktor		

Abkürzungen

3DP	3D-Printing
AABB	Axis Aligned Bounding Box
B-Rep	Boundary Representation
CSG	Constructive Solid Geometry
DLP	Digital Light Processing
EA	Evolutionärer Algorithmus
FLM	Fused Layer Manufacturing
GA	Genetischer Algorithmus
GF	Generative Fertigung
IGES	Initial Graphics Exchange Format
LLM	Layer Laminate Manufacturing
MJM	Multi-Jet Modeling
PJM	PolyJet Modeling
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
SGC	Solid Ground Curing
SLA	Stereolithography Apparatus
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selektives Laser Sintern
STEP	Standard f. t. Exchange of Product Data
STL	Surface Tessellation Language

Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

Abb. 2-1: Systematik der Anwendungen der Rapid-Technologie (in Anl. an [Geb07]).....	4
Abb. 2-2: Nutzung der Rapid-Technologie (in Anl. an [Woh08])	5
Abb. 2-3: Einsatz der Rapid-Technologie im Produktentstehungsprozess.....	6
Abb. 2-4: Technologische Prozesskette der Rapid-Technologie	8
Abb. 2-5: Datenmodellierung für den Einsatz generativer Fertigungsverfahren	8
Abb. 2-6: Automatische Platzierung von Bauteilen im Bauraum	14
Abb. 2-7: Einsatzmöglichkeiten von Stützkonstruktionen	15
Abb. 2-8: Stufeneffekt am Beispiel eines Lüfters.....	16
Abb. 3-1: Print-Through-Effekt bei Polymerisations-Verfahren	20
Abb. 3-2: Pulveranhaftung infolge inhomogener Wärmeleitung (in Anl. an [Seh10])	20
Abb. 3-3: Zusammensetzung der Fertigungskosten.....	23
Abb. 3-4: Zusammenhänge orientierungsabhängiger Produkt- und Prozesseigenschaften....	25
Abb. 3-5: Objektbasierte Bauteilplatzierung im Bauraum.....	26
Abb. 3-6: Architektur des Optimierungssystems.....	27
Abb. 4-1: Erhöhung der Approximationsgenauigkeit durch Tetraeder-Bildung.....	30
Abb. 4-2: Verschiedene Slicing-Situationen an Tetraedern.....	31
Abb. 4-3: Beispiel eines Container-Beladungsproblems	39
Abb. 4-4: Ermittelte Leerräume im Packprozess.....	40
Abb. 4-5: <i>Multi-Faced-Buildup</i> von LIM et al.....	40
Abb. 4-6: Klassifizierung der Schichtzerlegungsansätze	42
Abb. 4-7: Prinzip der adaptiven Schichtzerlegung	43
Abb. 4-8: Definition der Spitzenhöhe in einem Fehlerdreieck	44
Abb. 4-9: Rekursive Ansätze zur adaptiven Schichtzerlegung ([MKD99], [SHB97]).....	45
Abb. 5-1: Simplexes im \mathbb{R}^k (mit $k = 0, 1, 2, 3$).....	51
Abb. 5-2: Dreiecksorientierung	53
Abb. 5-3: Ermittlung eines Polygon-Flächeninhalts.....	54
Abb. 5-4: Ermittlung eines Polyeder-Volumens	55
Abb. 5-5: Durchdringungskurven (Ebene – Polyeder, Dreieck).....	56
Abb. 5-6: Sonderfälle der Ebene-Dreieck-Durchdringung.....	57
Abb. 5-7: Modifizierter Ear-Clipping-Algorithmus.....	58
Abb. 5-8: Ear-Clipping bei Polygonen mit Löchern	59
Abb. 5-9: Beschreibung einer Rotation (Euler-Winkel, Quaternion)	60
Abb. 5-10: Konvexe Hülle einer Punktmenge (a) im \mathbb{R}^2 und (b) im \mathbb{R}^3	62
Abb. 5-11: Graham-Scan-Algorithmus	63
Abb. 5-12: Quickhull-Algorithmus (3D).....	64
Abb. 5-13: Ermittlung des Durchmessers einer Punktmenge im \mathbb{R}^3	65
Abb. 5-14: Objektnetz eines Polygonnetzes.....	66

Abb. 5-15: Einfache Listenstruktur eines Polygonnetzes	67
Abb. 5-16: Erweiterte Listenstruktur eines Polygonnetzes	67
Abb. 5-17: Segmentierung polygonaler Netze und Segmentapproximation (Quelle: [Att08])	68
Abb. 5-18: Klassifizierung von Netzregionen anhand einer Höhenfunktion	70
Abb. 5-19: Segmentierung einer Kurbelwelle	71
Abb. 5-20: Volumenfehler als Formabweichungsmaß	72
Abb. 5-21: Ermittlung des Fehlerdreiecks zur Bestimmung der Spitzenhöhe	73
Abb. 5-22: Inklusionsbeziehungen zwischen Original- und Schichtmodell	74
Abb. 5-23: Support-Kontaktstellen an einer Pleuelstange	77
Abb. 5-24: Parallelprojektion von Facetten zur Ermittlung von Kontaktflächen	77
Abb. 5-25: Berechnung des Durchschnitts von zwei Dreiecken	78
Abb. 5-26: Werkzeugarbeitsraum zur Entfernung von Supports	80
Abb. 5-27: Anwendung von BSP zur Ermittlung von Durchdringungen (in Anl. an [Ebe00])	.81
Abb. 5-28: Bauteilstabilität eines Schichtmodells.....	82
Abb. 6-1: Einteilung der Optimierungsverfahren	89
Abb. 6-2: Pareto-Front bei Mehrzieloptimierungen	89
Abb. 6-3: Leistungsbewertung von Mehrzieloptimierungen	90
Abb. 6-4: Entwicklung evolutionärer Algorithmen	92
Abb. 6-5: Beispiel einer Fitnesslandschaft	95
Abb. 6-6: Prinzipieller Ablauf eines GA	96
Abb. 6-7: Auswahlverfahren der Selektion.....	100
Abb. 6-8: 1-Punkt-Crossover	101
Abb. 6-9: Beispiel für die Anwendung genetischer Operatoren.....	102
Abb. 7-1: Programmablaufplan zur Orientierungsoptimierung.....	104
Abb. 7-2: Klassenhierarchie der Bibliothek GALib	105
Abb. 7-3: Erweiterung des binären STL-Formats.....	109
Abb. 7-4: Konvexe Hülle eines Motorblocks	110
Abb. 7-5: Sonderfälle der Ebene-Dreieck-Durchdringung beim Clipping.....	111
Abb. 7-6: Polygon-Anordnung zur geometrischen Definition von Flächen	112
Abb. 7-7: Punkt-in-Polygon-Test.....	113
Abb. 7-8: Integration des Optimierungssystems in das CAD-System SolidWorks	114
Abb. 8-1: Ergebnisdarstellung als 3D-Flächen- und 2D-Konturdiagramm	116
Abb. 8-2: Anwendungsbeispiel „Schnappriegel“	117
Abb. 8-3: Ergebnisdarstellung „Schnappriegel“	117
Abb. 8-4: Ergebnisdarstellung „Stier“	118
Abb. 8-5: Anwendungsbeispiel „Block“	118
Abb. 8-6: Anwendungsbeispiel „Pleuelstange“	119
Abb. 8-7: Ergebnisdarstellung „Pleuelstange“	120
Abb. 8-8: Mögliche Orientierungen für das optimierte Bauteil „Pleuelstange“	120
Abb. 8-9: Anwendungsbeispiel „Halterung“	121
Abb. 8-10: Ergebnisdarstellung „Halterung“	121
Abb. 8-11: Anwendungsbeispiel „Pfannengriff“	122
Abb. 8-12: Ergebnisdarstellung „Pfannengriff“	122
Abb. 8-13: Anwendungsbeispiel „Knieimplantat“	123
Abb. 8-14: Ergebnisdarstellung „Knieimplantat“	123
Abb. 8-15: Anwendungsbeispiel „Kolbengehäuse“	124
Abb. 8-16: Ergebnisdarstellung „Kolbengehäuse“	124
Abb. 8-17: Anwendungsbeispiel „Bremshebel“	125

Abb. 8-18: Ergebnisdarstellung „Bremshebel“	125
Abb. 8-19: Anwendungsbeispiel „Ventilgehäuse“	126
Abb. 8-20: Ergebnisdarstellung „Ventilgehäuse“	127
Abb. 8-21: Optimierungsteilergebnisse „Ventilgehäuse“	127
Abb. 8-22: Beispiele für bewertete Orientierungen des Ventilgehäuses	128
Abb. 8-23: Anwendungsbeispiel „Seitenspiegel“	129
Abb. 8-24: Ergebnisdarstellung „Seitenspiegel“	129
Abb. 8-25: Optimierungsteilergebnisse „Seitenspiegel“	130
Abb. 8-26: Beispiele für bewertete Orientierungen des Seitenspiegels.....	130
Abb. 8-27: Erweitertes Anwendungsbeispiel „Ventilgehäuse“	131
Abb. 8-28: Erweiterte Ergebnisdarstellung „Ventilgehäuse“	131
Abb. 8-29: Erweiterte Optimierungsteilergebnisse „Ventilgehäuse“	132
Abb. 8-30: Beispiele für ganzheitlich bewertete Orientierungen des Ventilgehäuses	133
Abb. 8-31: Diversität der Suchraumabdeckung	135
Abb. 8-32: Beispiel eines Konvergenzverlaufs	135
Abb. A-1: Verfahrensprinzip der Stereolithographie.....	154
Abb. A-2: Verfahrensprinzip der Masken-Stereolithographie am Beispiel SGC.....	156
Abb. A-3: Verfahrensprinzip des Polymer-Druckens am Beispiel PJM	158
Abb. A-4: Verfahrensprinzip der Sinter- und Schmelz-Verfahren am Beispiel SLS	159
Abb. A-5: Verfahrensprinzip der Schicht-Laminat-Verfahren am Beispiel LOM	161
Abb. A-6: Verfahrensprinzip der Extrusionsverfahren am Beispiel FDM	163
Abb. A-7: Verfahrensprinzip der 3D-Druck-Verfahren am Beispiel 3DP	164
Tabellen	
Tab. 2-1: Fehlerquellen in STL-Datensätzen (in Anl. an [VDI07])	10
Tab. 3-1: Qualitätskriterien für Prototypen (in Anl. an [VDI07])	24
Tab. 4-1: GF-gerechte Ressourcen in STEP	32
Tab. 4-2: Erfüllung der Anforderungen verschiedener Schnittstellenformate	33
Tab. 4-3: Klassifizierung von Packproblemen.....	38
Tab. 5-1: Vor- und Nachteile einfacher Listenstrukturen.....	67
Tab. 5-2: Numerische Repräsentation von Anordnungsvarianten im Bauraum	85
Tab. A-1: Beispiele industrieller Laser-Scanner-Verfahren.....	156
Tab. A-2: Beispiele industrieller Lampen-Masken-Verfahren.....	157
Tab. A-3: Beispiele industrieller Polymer-Druck-Verfahren	158
Tab. A-4: Beispiele industrieller Sinter- und Schmelz-Verfahren	160
Tab. A-5: Beispiele industrieller Schicht-Laminat-Verfahren	162
Tab. A-6: Beispiele industrieller Extrusionsverfahren	164
Tab. A-7: Beispiele industrieller 3D-Druck-Verfahren.....	165

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Globalisierung der Märkte, zunehmende Komplexität und Diversifikation der Produkte sowie die Produkt- und Prozessinnovationen als zentrale Wettbewerbsfaktoren haben die Unternehmen zu neuen Strategien der Produktentwicklung gezwungen. Die stetig wachsende Zahl interdisziplinärer Wechselwirkungen innerhalb der Produktentwicklung in den letzten Jahren führte zur weitestgehenden Parallelisierung einzelner Prozessabläufe (sog. *Simultaneous Engineering*) anstelle der traditionell sequenziellen Abarbeitung. An die am Produktentwicklungsprozess beteiligten Unternehmensbereiche werden hohe Erwartungen hinsichtlich der Reaktionsfähigkeit und der Flexibilität gestellt, da hier die Qualität, Zeit und Kosten für das Produkt und den Produktentstehungsprozess wesentlich beeinflusst werden. Insbesondere die Fertigung von Prototypen für die in einem Produktentwicklungsprozess notwendigen Designüberprüfungen und Funktionstests zur Sicherstellung der Entwicklungsabsichten tragen maßgeblich zur Entwicklungszeit bei. Dies beeinflusst auch den Zeitpunkt der Markteinführung (*Time-to-Market*), der zunehmend für den Produkterfolg entscheidend ist. Daher gewinnt die Integration generativer Fertigungsverfahren zur Erzeugung physischer Prototypen (*Rapid Prototyping – RP*) als Verifikationsobjekt zunehmend an Bedeutung. Die sogenannte Rapid-Technologie zeichnet sich besonders durch geringe Fertigungszeiten aus, so dass in jeder Entwicklungsphase schnell Prototypen hergestellt werden können, die die zur Entscheidungsfindung notwendigen Bewertungsmerkmale (Qualität, Maßgenauigkeit, Optik, Haptik, Festigkeit, Funktion, etc.) unter gegebenen Rahmenbedingungen (Qualität, Zeit, Kosten) liefern. Die rasante Weiterentwicklung dieser Technologie hat zudem die Erschließung weiterer Anwendungsbereiche ermöglicht, die weit über die Herstellung von Muster- oder Prototypenbauteilen hinausgehen: die generative Fertigung von Vor- und Kleinserienwerkzeugen bis hin zu Bauteilen mit Fertigteilecharakter (*Rapid Manufacturing – RM*). Einhergehend mit den Verfahrensverbesserungen und dem zunehmenden Einsatzspektrum steigt jedoch auch die Anzahl verfahrensspezifischer Wechselwirkungen und somit die Komplexität der Prozessvorbereitung. Dies betrifft insbesondere die Festlegung der Bauteilorientierung unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Kriterien, die einen wesentlichen Einfluss auf die Bauteil- und Prozessqualität ausüben. Während noch zahlreiche Einflussgrößen nur unzureichend bekannt sind, baut das Verfahrens-Know-how im Wesentlichen auf den zumeist langjährigen Erfahrungen der Anlagenhersteller und Anlagenbediener auf. Eine in Normen und Richtlinien festgehaltene Wissensbasis liegt bis dato nicht vor. Dies hat zu einer bis heute anhaltenden fehlenden Breitenwirksamkeit der Technologie geführt. Des Weiteren wird hierdurch sowohl die Neueinführung dieser Technologie in Unternehmen, als auch die Substitution traditioneller Fertigungsverfahren im Konstruktionsprozess erschwert. Die Prozesskette von der Konstruktion hin zur generativen Fertigung ist durch eine fehlende Interdisziplinarität gekennzeichnet, so dass aufgrund des fehlenden Prozesswissens im Konstruktionsumfeld eine funktions- und fertigungsgerechte Gestaltung mit gleichzeitiger Absicherung der Konstruktionsziele nur bedingt möglich ist.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Bisher existiert kein Ansatz zur Schließung der CAD-RP/RM-Kette durch Integration prozessspezifischen Wissens in den Konstruktionsprozess. Zudem fehlt völlig eine zur Standardisierung und Automatisierung notwendige Wissensbasis. Aus dieser Motivation heraus ist es Ziel dieser Arbeit, ein rechnergestütztes Optimierungsmodell zu entwerfen, das auf Basis zu entwickelnder Kennwerte und Regeln die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Auswahl der Bauteilorientierung unter Berücksichtigung qualitativer und wirtschaftlicher Aspekte unterstützt. Zugleich soll hiermit die Visualisierung der Wechselwirkungen, insbesondere bei Bauteilen komplexer Geometrie, ermöglicht werden. Auf diese Weise soll der Einsatz des Optimierungssystems im Konstruktionsprozess die Umsetzung von Konstruktionsabsichten mit Hilfe der generativen Fertigung und unter Beachtung der damit verknüpften Besonderheiten fördern. Zu diesem Zweck sind die bei der Wahl der Orientierung zu berücksichtigenden Einflusskriterien zu quantifizieren und mit Hilfe mathematischer Modelle entsprechende Gütekriterien zu definieren. Das Ziel in dieser Arbeit ist nicht die Verbesserung der Prozesssteuerung, sondern vielmehr die Optimierung der Bauteilorientierung unter geometrischen Gesichtspunkten, jedoch unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Randbedingungen. Zur multikriteriellen Bewertung möglicher Orientierungen sind schließlich entsprechende Algorithmen zu entwickeln, die eine Mehrzieloptimierung in vertretbaren Antwortzeiten gewährleisten. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, die nur vereinzelt Qualitätsfaktoren adressieren, soll in dieser Arbeit eine ganzheitliche Betrachtung der Auswahl der Bauteilorientierung umgesetzt werden. Ein weiteres wesentliches Unterscheidungsmerkmal stellt die allgemeine Anwendbarkeit dar. So soll das Optimierungsmodell nicht auf einfache Geometrien, wie geometrische Primitive oder konvexe Körper, beschränkt sein und möglichst für verschiedene Verfahren Anwendung finden können. Zudem soll das Optimierungssystem eine in die CAX-Umgebung integrierbare Lösung darstellen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist systematisch aufgebaut und beginnt im Kapitel 2 mit einer Einführung in die Grundlagen der Rapid-Technologie. Hier sollen wesentliche technologische Aspekte, die bei der Konzeptentwicklung berücksichtigt werden müssen, vermittelt werden. Auf Grundlage der aufgezeigten Potenziale und Grenzen der hier behandelten Fertigungstechnologie erfolgt im Kapitel 3 die Konzeption der Optimierungsaufgabe. Wesentliche Inhalte sind hier die entwickelten Anforderungen an die Bauteilorientierung sowie der Konzeptentwurf. Das Kapitel 4 enthält den Stand der Wissenschaft und dient unter anderem zur Abgrenzung sowie wissenschaftlichen Einordnung der vorliegenden Arbeit. Kapitel 5 und Kapitel 6 schließen den ersten Teil der Arbeit mit der Herleitung sowie Präsentation der entwickelten Konzepte zur Lösung von Teilproblemen und der methodischen Umsetzung der Mehrzieloptimierung ab. Der zweite Teil der Arbeit enthält im Kapitel 7 die praktische Umsetzung des Gesamtkonzepts sowie die Validierung und Evaluierung der Algorithmen im Kapitel 8. Die Arbeit wird schließlich mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 9 abgeschlossen. In der heutigen Praxis werden generische Bezeichnungen der einzelnen Verfahren der Rapid-Technologie häufig mit Produktnamen und Herstellerbezeichnungen vermischt. In dieser Arbeit werden ausschließlich die generischen Bezeichnungen verwendet, während vorkommende Herstellerbezeichnungen explizit als solche gekennzeichnet werden.

2 Grundlagen der Rapid-Technologie

Die generative Fertigung basiert in Abgrenzung zu klassischen Fertigungsverfahren auf dem Schichtbauprinzip und ist durch eine nahezu unbegrenzte Freiheit der Formgestaltung gekennzeichnet. Bei dem Versuch der fertigungstechnischen Einordnung wird deutlich, dass die generativen bzw. schichtorientierten Fertigungsverfahren (engl. *layered manufacturing*) sich prinzipiell nicht eindeutig einer Gruppe der nach DIN 8580 festgelegten Einteilung der Fertigungsverfahren zuordnen lassen. Einerseits wäre eine Zuordnung zu den urformenden Verfahren für die meisten Anwendungen am ehesten zutreffend. Andererseits verfolgen nicht alle generativen Verfahren ein urformendes Verfahrensprinzip, so dass diese aufgrund ihres additiv wirkenden Charakters den fügenden Verfahren zugeordnet werden müssten. Daher ist die Forderung nach einer eigenen Hauptgruppe durchaus berechtigt. Die Vielzahl verschiedener Verfahrensprinzipien der generativen Fertigung führt schließlich zu mehreren Möglichkeiten der Klassifizierung. Eine gebräuchliche Methode ist die Einteilung nach dem Zustand des Ausgangsmaterials. Weitere mögliche Unterscheidungen orientieren sich an der Anzahl der Prozessschritte oder dem Einsatzzweck im Produktentstehungsprozess. Im Rahmen nationaler sowie internationaler Bestrebungen zur Standardisierung der Nomenklatur generativer Prozesse erfolgt in der VDI-Richtlinie 3404 [VDI07] eine Einteilung und Abgrenzung der Verfahren nach den kommerziell bedeutendsten Anwendungen. So uneindeutig sich derzeit noch die Klassifizierung darstellt, so fällt auch das Verständnis der Begriffsdefinitionen aus. Die mögliche Einteilung der Fertigungsverfahren in *subtraktiv*, *additiv* und *formativ* hat dazu geführt, dass sich der Begriff *Additive Manufacturing* im englischen Sprachgebrauch durchgesetzt hat. Im nordamerikanischen Raum wird dagegen primär der Begriff *Solid Free-Form Fabrication* verwendet. Der europäische Soziolekt¹ ist dadurch gekennzeichnet, dass häufig generative Fertigungsverfahren unabhängig von ihrem Einsatzzweck verallgemeinernd als *Rapid Prototyping* bezeichnet werden. Wissenschaftlich betrachtet findet hierdurch die Differenzierung in der Anwendung bzw. in dem Verwendungszweck des herzustellenden Bauteils keine angemessene Berücksichtigung mehr. Daher werden in dieser Arbeit alle schichtweise arbeitenden generativen Verfahren unter dem Begriff *Rapid-Technologie* zusammengefasst. Gelegentlich finden sich in der Literatur jedoch Definitionen dieses Begriffes, die auch abtragende Hochgeschwindigkeitsverfahren (z. B. High Speed Cutting) einschließen. Hierdurch soll die Eigenschaft der „schnellen“ Fertigung in den Vordergrund gestellt werden. In der Praxis findet diese Begriffsdefinition jedoch kaum Anwendung, so dass der Begriff „Rapid-Technologie“ in diesem Zusammenhang als ein Oberbegriff angesehen werden kann. Neben dieser Bezeichnung wird in der vorliegenden Arbeit auch der Begriff *generative Fertigung* (GF) zur Betonung des schichtweise additiv arbeitenden Charakters verwendet. Eine gute Einführung in die Grundlagen der Rapid-Technologie bieten [BeTa98], [CLL03], [Geb07], [KaNa06], [Noo06] und [Zäh06].

¹ Als Soziolekt (bzw. Gruppensprache) wird das Sprachsystem einer definierten Gruppe (z. B. Fachgruppe) bezeichnet. Jede Fachsprache kann somit als Soziolekt angesehen werden.

2.1 Systematik der Technologieanwendungen

Die ersten Anwendungen generativer Fertigungsverfahren Ende der 80er Jahre wurden als Rapid Prototyping bezeichnet. Dieser Begriff hat sich bis heute etabliert und wird häufig irreführenderweise auch für verwandte Verfahren verwendet. Die umfangreichen Weiterentwicklungen und die Ausweitung des Einsatzgebietes der generativen Fertigungsverfahren erfordern aus heutiger Sicht eine feinere Abgrenzung der Anwendungen (Abb. 2-1). Demnach gliedert sich die Rapid-Technologie in die Anwendungen zur Herstellung von Modellen und Prototypen (Rapid Prototyping) sowie zur Fertigung von Bauteilen mit Endproduktcharakter (*Rapid Manufacturing*). *Rapid Tooling* bezeichnet die generative Fertigung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen und ist je nach Anwendungsfall dem Rapid Prototyping oder dem Rapid Manufacturing zuzuordnen.

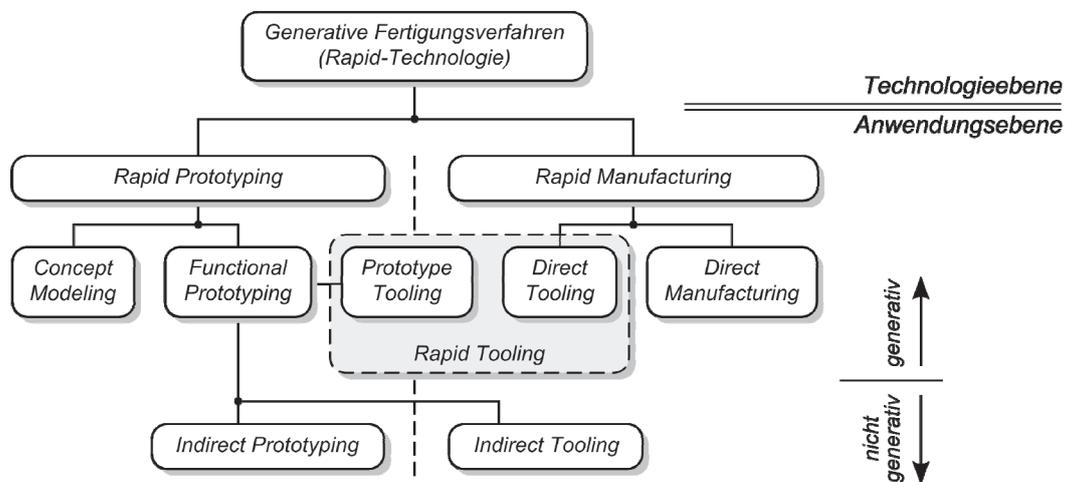


Abb. 2-1: Systematik der Anwendungen der Rapid-Technologie (in Anl. an [Geb07])

2.1.1 Rapid Prototyping

Diese älteste Form der Anwendung der Rapid-Technologie dient zur schnellen Herstellung physischer Bauteile ohne Endproduktcharakter. Je nach Verwendungszweck (Design-, Geometrie-, Funktionsprototyp, etc.) weisen diese Bauteile repräsentative Eigenschaften eines zu fertigenden Produktes auf, während die für die Produktverifikation nicht relevanten Eigenschaften so weit wie möglich abstrahiert werden. Rapid Prototyping ermöglicht demnach die Erzeugung aussagekräftiger Modelle zur Absicherung einzelner Produkteigenschaften. Werden die Modelle zur 3D-Visualisierung verwendet, so spricht man von *Concept Modeling* oder auch *Solid Imaging*.

2.1.2 Rapid Manufacturing

Unter Rapid Manufacturing versteht man die schnelle und kostengünstige Herstellung von Bauteilen mit Endproduktcharakter. Im Gegensatz zu den ursprünglichen Anwendungen der Rapid-Technologie handelt es sich bei den hier gefertigten Bauteilen aufgrund der zahlreichen Verfahrensverbesserungen und des erweiterten Materialspektrums um marktfähige Produkte (*Direct Manufacturing*) oder um Vor- und Kleinserienwerkzeuge (*Direct Tooling*).

Dadurch, dass die generativ gefertigten Bauteile mechanisch-technologische Zieleigenschaften aufweisen sollen, lässt sich die Notwendigkeit einer Anpassung der Konstruktionssystematik ableiten. Anstelle der konstruktiven Auslegung im Hinblick auf die Nutzung traditioneller Fertigungsverfahren tritt hier die RM-Gerechtigkeit der Konstruktion verstärkt in den Vordergrund. Nur auf diese Weise lassen sich die Potenziale der direkten Fertigung ausschöpfen. Weiterführende Informationen zu Anwendungsbereichen des Rapid Manufacturing oder den damit verbundenen Potenzialen finden sich in [Bar08] und [HHD06].

2.2 Die Rapid-Technologie im Produktentstehungsprozess

Die industrielle Serienproduktion ist gekennzeichnet durch eine aufgrund der Berücksichtigung von Kundenwünschen vorangetriebene Diversifikation, eine zunehmende Produktkomplexität und somit einen stetig auf den Produktentwicklungsprozess wirkenden Zeitdruck zum Erhalt kurzer Innovationszyklen. Die Globalisierung der Märkte und der damit einhergehende Wettbewerbsdruck auf die Unternehmen haben dazu geführt, dass die Umgehung des Wettbewerbs durch Konzentration auf Marktnischen nur noch selten zum Erfolg führt. Stattdessen gilt es, mit Hilfe geeigneter Simulations- und Verifizierungstechniken moderne Produktentwicklungsstrategien anzuwenden, die zu einer Technologieführerschaft beitragen können. Virtuelle sowie physische Prototypen als Simulations- und Verifikationsobjekte bilden dabei die Grundlage interdisziplinärer Zusammenarbeit und unterstützen die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Produktgestaltung und der Produktfunktionalität. Darüber hinaus sichern sie fehlerarme Prozessabläufe im Rahmen der Produktion und begünstigen verborgene Innovationskräfte. Generativ hergestellte Bauteile weisen hierbei die größten Potenziale für die physische Produktverifikation auf, welche, neben zur Herstellung von Design-, Geometrie- und Funktionsprototypen (Rapid Prototyping), zunehmend für die Fertigung von Vor- und Kleinserienwerkzeugen (Rapid Tooling) genutzt werden. Aktuelle Statistiken zur Verteilung der Technologie-Nutzung (Abb. 2-2) spiegeln dies wider.

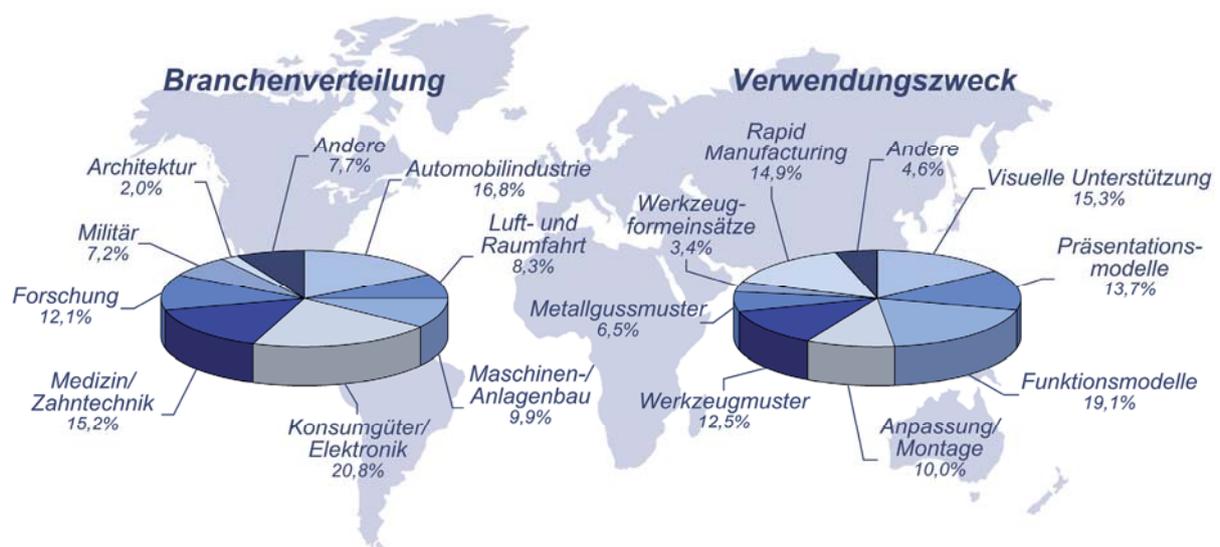


Abb. 2-2: Nutzung der Rapid-Technologie (in Anl. an [Woh08])

So wird die Rapid-Technologie neben anderen Branchen maßgeblich in der Automobil- sowie in der Konsumgüterindustrie zur visuellen Unterstützung, Erstellung von Funktionsmodellen

oder zur Fertigung von Werkzeugmustern bzw. Werkzeugformeinsätzen angewendet. Darüber hinaus haben zahlreiche Entwicklungen dazu geführt, dass generative Verfahren zunehmend zur werkzeuglosen Fertigung von Bauteilen mit seriennahen Eigenschaften (Rapid Manufacturing) eingesetzt werden, wobei der derzeitige Einsatz noch auf Nischenanwendungen in der Kleinserien-Fertigung beschränkt bleibt. Ein davon zunehmend profitierender Sektor stellt die Medizin bzw. Zahntechnik dar.

2.2.1 Einordnung der GF-Verfahren

Die Einsatzmöglichkeiten generativer Fertigungsverfahren sind grundsätzlich breit gefächert. Dies drückt sich insbesondere dadurch aus, dass die verschiedenen Technologieanwendungen in nahezu jeder Phase der Produktentstehung Anwendung finden. Eine scharf abgrenzende Zuordnung der Verfahren zu den einzelnen Phasen ist jedoch kaum möglich, da dies in der Regel produktabhängig ist. Daher liefert Abb. 2-3 lediglich einen groben Überblick der Verteilung mit zum Teil fließenden Übergängen. Hieraus ist erkennbar, dass das Rapid Prototyping im Wesentlichen den Phasen der Produktentwicklung zuzuordnen ist, hingegen das Rapid Tooling und das Rapid Manufacturing in der Fertigungsphase bzw. der Fertigungsvorbereitung angesiedelt ist. Trotz früherer Forschungsaktivitäten zur weitergehenden Integration der Rapid-Technologie in den Produktentwicklungsprozess, insbesondere in die Konstruktionsphase ([Bir02], [Geu96], [Mach99]), ist die Nutzung der Rapid-Technologie nach wie vor nicht Bestandteil einer durchgängigen CAD/CAM-Lösung.

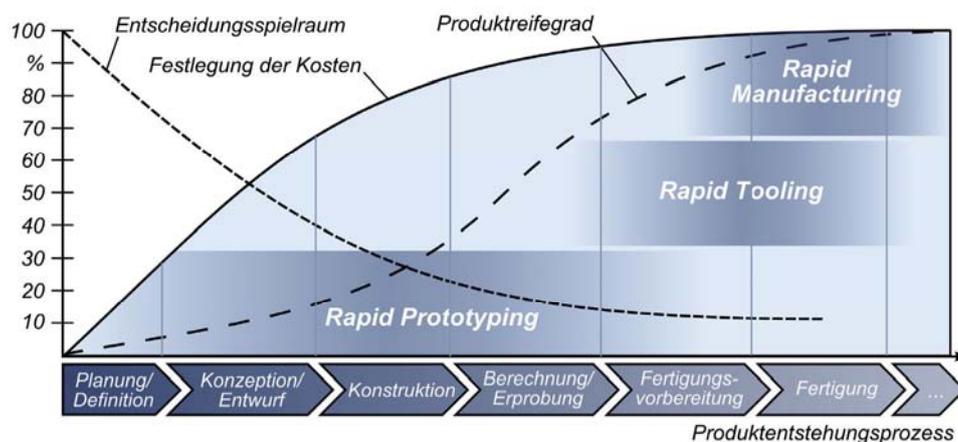


Abb. 2-3: Einsatz der Rapid-Technologie im Produktentstehungsprozess

2.2.2 Zukünftige Technologienutzung

Während die Rapid-Technologie im letzten Jahrzehnt noch vornehmlich zur Erzeugung physischer Prototypen angewendet wurde, haben die zahlreichen Weiterentwicklungen und die damit verbundenen Verbesserungen dazu geführt, dass neue Anwendungsfelder erschlossen werden konnten und sich die Rapid-Technologie in einigen Unternehmen als fester Bestandteil der Produktentwicklung etabliert hat. Der allgemeine wirtschaftliche Rückgang um die Jahrtausendwende hatte eine Marktberreinigung der Anlagenhersteller zur Folge, konnte jedoch aufgrund der sichtbaren Nutzenpotenziale nicht die Ausbreitung der Technologie verhindern. Vielmehr haben die Erschließung neuer Anwendungsfelder (z. B. durch neue ein-

setzbare Materialien) und der eingetretene hohe Kostendruck in den Unternehmen zu einem Umbruch in der Branche geführt. Daher werden derzeit von den Herstellern vermehrt kostengünstige Anlagen angeboten. Dabei handelt es sich zunehmend um Desktop-Lösungen für den schnellen Einsatz, insbesondere für das Concept Modeling. Der anhaltende Trend zur Senkung von Anschaffungs- und Betriebskosten könnte in Zukunft dazu führen, dass auch in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) generative Fertigungsanlagen zur Absicherung von Konstruktionszielen eingesetzt werden. Neben der günstigen Kostenentwicklung haben gerade neue einsetzbare Materialien den Weg der Rapid-Technologie für neue Anwendungen eröffnet (z. B. Explosionsschutz [TGKE09]). Dies spiegelt sich vor allem auch in dem in den letzten Jahren registrierten sprunghaften Anstieg medizinischer Anwendungen (z. B. orthopädische Implantate, chirurgische Planung, chirurgische Instrumente [Witt09], Dental-Applikationen u. v. a. m.) als auch in der vermehrten On-Demand-Fertigung personalisierter Produkte wider [Woh08]. Somit wird der Einsatz generativer Fertigungsverfahren auch zukünftig nicht auf den Produktentstehungsprozess beschränkt bleiben, sondern sich zunehmend auf angrenzende Phasen ausbreiten. Während das Concept Modeling zunehmend in den frühen Phasen eines Produktlebenszyklus angewendet werden kann, führen die materialbedingten Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften generativ hergestellter Bauteile zur vermehrten Anwendung des Rapid Manufacturing und Rapid Tooling. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit organisatorischer Anpassungen, wie z. B. die stärkere infrastrukturelle Einbindung der GF-Anlagen in die Fertigungsprozesskette. Die Erzeugung seriennaher oder sogar serienidentischer Bauteile mit Hilfe der generativen Fertigungstechnik erfordert eine engere Verknüpfung mit Nachbearbeitungsanlagen. Darüber hinaus muss der durchgängige Datentransfer gewährleistet sein, der sich derzeit auf eine manuelle Konvertierung der 3D-Geometrie und eine einseitige Datenübertragung zur GF-Anlage beschränkt.

2.3 Verfahrensgrundlagen

Generative Fertigungsverfahren basieren im Allgemeinen auf zwei grundlegenden Verfahrensschritten:

1. Erzeugung von Schichtinformationen auf Basis einer geeigneten Bauteilbeschreibung,
2. Generierung des Schichtenmodells durch schichtweise Abarbeitung bzw. fertigungstechnische Umsetzung der Schichtinformationen.

Hierbei muss jedoch zwischen der technologischen und der datentechnischen Prozesskette unterschieden werden. Zum besseren Prozessverständnis werden diese im Folgenden kurz erläutert.

2.3.1 Technologische Prozesskette

Die technologische Prozesskette beschreibt den Ablauf der Technologieschritte zur Erzeugung des Schichtenmodells (Abb. 2-4). Ausgangspunkt dieser Kette stellt die Datenerfassung bzw. die Datenerstellung (z. B. CAD-Modellierung) dar. Falls notwendig, wandelt die Anwendung mathematischer Methoden die vorliegende Bauteilbeschreibung in eine für die generative Fertigung geeignete Datenform um (z. B. Triangulierung). Anschließend erfolgt die Ori-

entierung des Modells zur Definition der Fertigungslage, so dass schließlich eine virtuelle Schichtzerlegung zu den für den generativen Fertigungsprozess notwendigen Schichtinformationen führt. Die physische Bauteilgenerierung erfolgt letztendlich durch die sequenzielle Erzeugung der jeweiligen Einzelschichten.

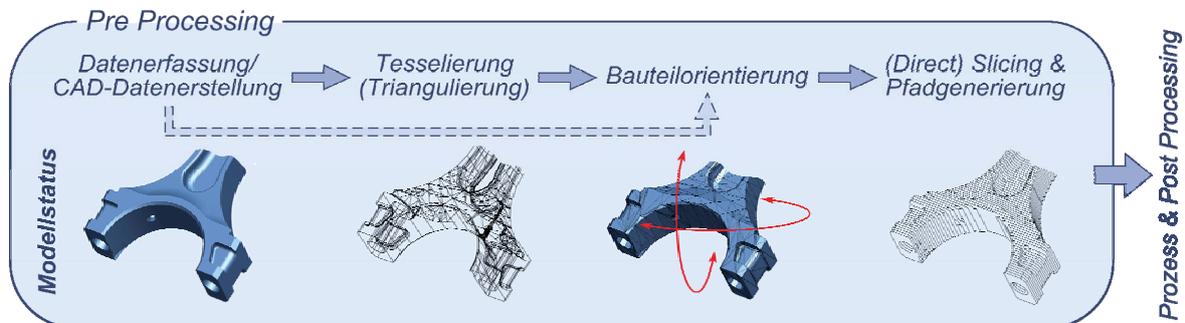


Abb. 2-4: Technologische Prozesskette der Rapid-Technologie

2.3.2 Datentechnische Prozesskette

Betrachtet man den Verfahrensablauf aus Sicht des zugrunde gelegten Datenmodells zur Bauteilbeschreibung, so gelangt man zur datentechnischen Prozesskette (Abb. 2-5). Sie zeigt die erforderlichen Schritte, um aus beliebigen Eingangsdaten (Punktwolke, Bilddaten oder 3D-Datenmodell) ein für den generativen Fertigungsprozess verwendbares Datenmodell mittels GF-gerechter Datenaufbereitung zu erhalten. Da die erforderlichen Konvertierungen der Modellrepräsentationen häufig mit Fehlern in der Interpretation einhergehen, wird in dieser Arbeit der Datenaufbereitung besondere Aufmerksamkeit gewidmet (Abschnitt 2.4).

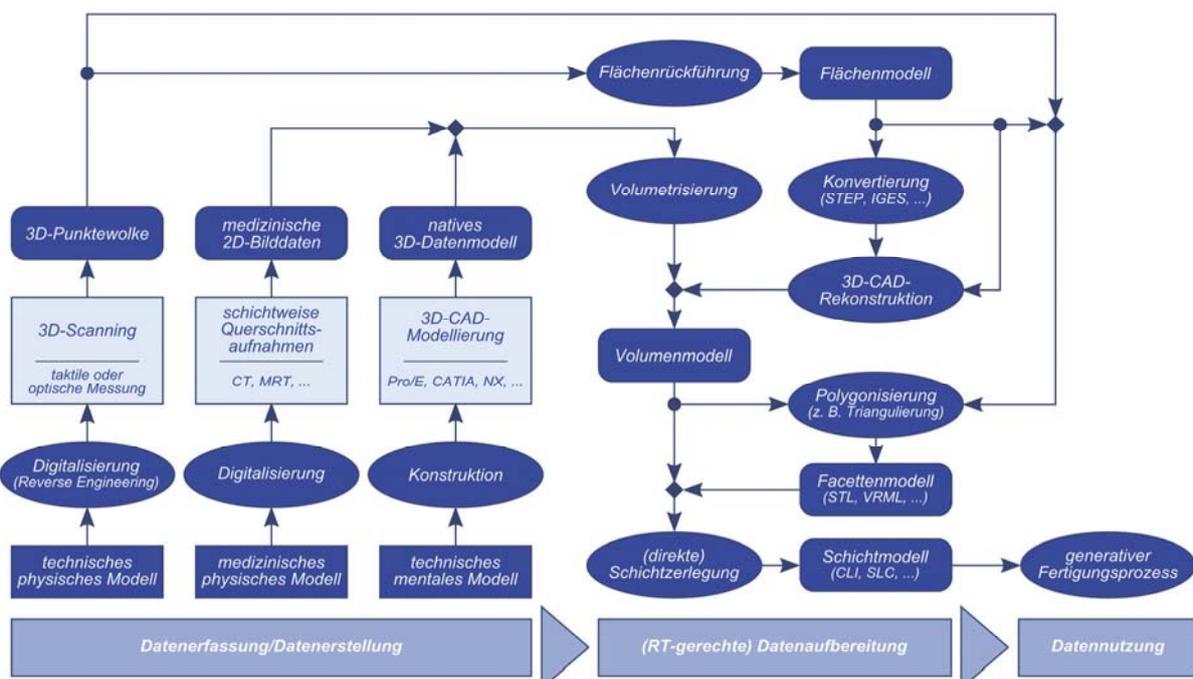


Abb. 2-5: Datenmodellierung für den Einsatz generativer Fertigungsverfahren

2.4 Datenaustausch für Anwendungen der Rapid-Technologie

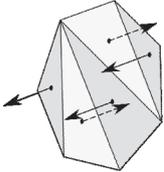
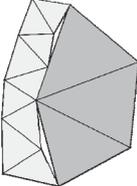
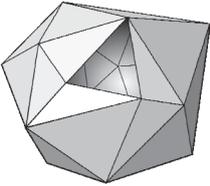
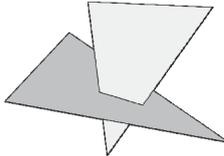
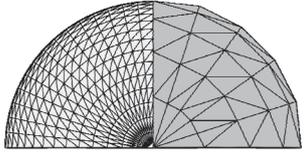
Zur Nutzung geometrischer Bauteilinformationen für Anwendungen der Rapid-Technologie müssen die vorliegenden Daten in der Regel (Ausnahme: *Direct Slicing*, siehe Abschnitt 2.5.4) über entsprechende Schnittstellenformate zwischen den verschiedenen Systemen ausgetauscht werden. Hierbei muss grundsätzlich zwischen der *Konvertierung*, also einem Wechsel in der Modellrepräsentation (z. B. von einer CSG- in eine triangulierte Grenzflächendarstellung (B-Rep)), und einem weitaus simpleren Prozess, der *Übersetzung*, unterschieden werden. Letzteres impliziert eine Formatänderung, jedoch mit Beschreibung der gleichen Modellrepräsentation. Beim Datenaustausch für Anwendungen der Rapid-Technologie handelt es sich überwiegend um eine Datenkonvertierung, da in der Regel das nativ oder neutral vorliegende CAD-Datenmodell in eine Beschreibung für Facettenmodelle überführt wird. Die mit der unterschiedlichen Beschreibung der Modellgeometrie verbundenen Schwierigkeiten sind vielfältiger Natur und können zu einer Verfälschung der zu übermittelnden Informationen bis hin zu nicht verwendbaren Daten führen. Aus diesem Grund bedarf es einer besonderen Berücksichtigung der qualitativen Einflussgrößen des Datenaustausches innerhalb einer CAD-RP/RM-Kette. Dies sind zum einen das Modellierungskonzept bzw. die Fertigkeiten und Kenntnisse des Anwenders und zum anderen das Triangulierungskonzept, also die softwareabhängige Datengenerierung des Facettenmodells mit ihren Einstellparametern. Nach HOFFMANN [Hof95] lassen sich problembehaftete Datenkonvertierungen für die Rapid-Technologie in der Regel auf folgende Fehler zurückführen:

- **Konstruktionsfehler** – Ursache hierfür ist häufig eine fehlerhafte Modellierungsstrategie (z. B. fehlende Boolesche Verknüpfungen) bzw. eine nicht für die Datenkonvertierung geeignete oder sogar gänzlich fehlende Datenvorbereitung.
- **Umsetzungsfehler** – Diese Fehlerquelle basiert auf Rundungsfehlern oder ungeeigneten Konvertierungseinstellungen. So kann ein zu geringes Maß für die Triangulierungsqualität zu einer ungenügenden Approximationsgenauigkeit führen.
- **Beschreibungsfehler** – Zu diesen Fehlern kommt es häufig infolge der zugrunde gelegten Algorithmen, wobei vorherige Konstruktions- und Umsetzungsfehler ebenfalls dazu führen, dass Fehlinterpretationen innerhalb der Algorithmen auftreten.

Typische Fehler eines Austauschdatensatzes (am Beispiel STL) und ihre möglichen Auswirkungen auf den Bauprozess bzw. die Bauteilqualität sind in Tab. 2-1 gegenübergestellt. So führen fehlorientierte Flächennormale, Fehlkonturen, Fehlstellen oder auch sich durchdringende bzw. überlappende Facetten zu Prozessstörungen aufgrund von Leerschichten oder einer unzureichenden Teiledefinition. Die Folge sind Verfälschungen oder einzelne Defekte an der Bauteilgeometrie sowie gegebenenfalls Schichtablösungen. Diese Bauteilwirkungen können mit einem Festigkeitsverlust in Baurichtung einhergehen. Ein häufig vorkommender Konstruktionsfehler ist ein nicht dem Problem angepasster Einstellparameter zur Triangulierung. Während eine zu feine Triangulierung zu einem unnötig hohen Rechenaufwand, zu langen Bauzeiten und Prozessstörungen führt, hat eine zu grobe Triangulierung eine schlechte Approximation der Originalgeometrie zur Folge. Mögliche Maßnahmen zur Behebung der auftretenden Fehler stellen häufig die zeitaufwändige Datenreparatur mit entsprechender Software oder die Modifikation des CAD-Datensatzes mit anschließender Neukonvertierung dar. Grundsätzlich muss bei der Erzeugung eines STL-Datensatzes berücksichtigt werden, dass je höher die Datenqualität des CAD-Modells ist, d. h. je sorgfältiger die Konstruktion vorgenommen wurde, desto kürzer werden die Zeiten für die Datenaufbereitung bei gleich-

zeitiger Erhöhung der Bauteilqualität. Derzeit existieren jedoch keine unterstützenden Anwendungen um die CAD-Datenqualität unter Berücksichtigung GF-spezifischer Anforderungen sicherzustellen [Woh08].

Tab. 2-1: Fehlerquellen in STL-Datensätzen (in Anl. an [VDI07])

	<i>I</i> <i>Fehlorientierung</i>	<i>II</i> <i>Fehlkontur</i>	<i>III</i> <i>Fehlstelle</i>	<i>IV</i> <i>Durchdringung/ Überlappung</i>	<i>V</i> <i>Triangulierung</i>
					
Typ	Datenfehler	Prozessauswirkung	Bauteilwirkung	mögl. Maßnahmen	
I	Fehlorientierung von Flächennormalen	Prozessstörungen durch Leerschichten oder unzureichende Teiledefinition	Geometrieverfälschung, Defekte durch Prozessstörungen, Schichtablösung und/oder Festigkeitsverlust in Baurichtung	Invertierung fehlorientierter Flächennormalen	
II	Fehlkonturen			Netzreparatur (Healing)	
III	Fehlstellen (fehlende Dreiecke)			Schließen des Polygonnetzes	
IV	Durchdringungen/Überlappungen			Verschneiden von Flächen, Boolesche Verknüpfungen	
V	zu feine Triangulierung	hoher Rechenaufwand, lange Bauzeiten, Prozessstörungen durch zu große Datenmengen	Defekte durch Prozessstörungen	Triangulierung mit angepassten Einstellparametern	
	zu grobe Triangulierung	keine	zu grobe Wiedergabe der Originalgeometrie	Triangulierung mit angepassten Einstellparametern	

2.4.1 STL

Die Ermittlung der notwendigen Schichtinformationen wird durch eine mathematische (virtuelle) Zerlegung der Geometriepäsentation anhand eines Schnittstellenformats vorgenommen. Ein weit verbreitetes Verfahren ist die Nutzung des STL-Datenformats (STL – ursprünglich *STereoLithography*, heute *Surface Tessellation Language*, auch bekannt unter *Standard Triangulation Language*) als De-facto-Standard für Anwendungen der Rapid-Technologie. Hierbei wird die Oberfläche eines 3D-Modells tesselliert, genauer gesagt trianguliert, also mit planaren Dreiecken unterschiedlicher Größe überzogen. Einstellparameter (z. B. Sehnenhöhe) steuern die Größe der Dreiecksfacetten und somit die Genauigkeit der Approximation. Ursprünglich wurde dieses Format 1987 für die Firma *3D Systems* für den Transfer von CAD-Daten für Stereolithographie-Anwendungen entwickelt. Trotz bis dato fehlender Standardisierung dieser Schnittstelle hat sich das STL-Format mittlerweile in allen Bereichen der Rapid-Technologie etabliert. Zum einen durch die einfache mathematische Beschreibung der facettierten Oberfläche und zum anderen durch die frühzeitige Veröffentlichung der Schnittstellenbeschreibung wurde die rasante Verbreitung dieses Dateiformats begünstigt, so dass nahezu jedes CAD-System und jede Software zur Unterstützung des generativen Fertigungsprozesses die STL-Schnittstelle unterstützt. Doch gerade hier liegt ein wesentliches Problem, da die Anforderungen an Schnittstellenformate für GF-Zwecke gestiegen sind, während das STL-Format nicht oder nur kaum weiterentwickelt wurde [Boh97]. Im Zuge der Verfahrens-

verbesserungen und Neuentwicklungen heutiger Anwendungen der Rapid-Technologie haben sich folgende Nachteile des STL-Formats herauskristallisiert:

- STL stellt aufgrund der Polygondarstellung nur eine Approximation der Originalgeometrie dar. Die Möglichkeiten der Nachbesserungen am STL-Bauteil sind aufgrund der Abweichungen vom Originalmodell eingeschränkt.
- Die in CAD-Systemen umgesetzten Algorithmen zur Konvertierung in das STL-Format liefern keine konstant hohe Qualität. Hierbei kommt es häufig zu Umsetzungsfehlern und syntaktischen Darstellungsfehlern (Lücken, Überlappungen, Fehlorientierung der Normalenvektoren, etc.) [NaMa03]. Die hier zugrunde liegenden Facettierungsalgorithmen stammen noch aus der Zeit vor der generativen Fertigungstechnik und wurden hauptsächlich zur Visualisierung von Geometrien in der Computertechnik, insbesondere für die Spiele- und Grafikanwendungen entwickelt, bei denen keine Notwendigkeit von geschlossenen und richtig orientierten Oberflächen bestand. Dies macht häufig eine zum Teil sehr aufwändige Nachbearbeitung mit entsprechender GF-Software oder der Front-End-Software der GF-Anlage notwendig.
- STL-Dateien erreichen ein Vielfaches der ursprünglichen Dateigröße. Dieser Umstand ist auf die redundante Speicherung der Dreieckskoordinaten und des Normalenvektors zurückzuführen. Jede Dreiecksfacette wird durch die Speicherung ihrer drei Eckpunkte und des Normalenvektors definiert. Da immer mindestens drei, je nach Komplexität des Bauteils auch mehrere, Dreiecke einen gemeinsamen Eckpunkt besitzen, wird jeder Punkt mindestens dreimal abgespeichert. Zudem lässt sich mit Hilfe der Rechte-Hand-Regel die Richtung des Normalenvektors ermitteln, so dass eine explizite Angabe hinfällig ist. Die zunehmend erreichbare Genauigkeit (Auflösung) moderner GF-Anlagen wird die Dateigröße im STL-Format auch zukünftig weiter ansteigen lassen.
- Die für neuere GF-Verfahren geeigneten Informationen bezüglich Farbgebung, Texturen oder auch Materialien lassen sich nicht oder nur schlecht im STL-Format speichern. Wäre die Speicherung durch Anpassung der Schnittstelle möglich, so wären diese Informationen mit dem gesamten Dreieck gekoppelt. Eine gewünschte hohe Farb- und Texturqualität würde somit zur Notwendigkeit einer feineren Triangulierung führen, unabhängig von der geforderten Abbildungsgenauigkeit der Geometrie.
- Numerische Daten werden durch Datentypen mit unzureichender Genauigkeit dargestellt. Dies führt zu Rundungsfehlern bei Nachfolgeprozessen. Die Tatsache, dass Facettenkoordinaten in einigen Systemen positive Werte annehmen müssen (positiver Oktant), verstärkt an dieser Stelle den Effekt.
- Das anschließende Slicing des facettierten Körpers kann sich bei großen STL-Dateien aufgrund fehlender Topologie als sehr zeitaufwändig erweisen.

2.4.2 Weitere 3D-Schnittstellenformate

Neben dem Quasi-Standard STL ermöglichen heutige GF-Anlagen auch einen Datentransfer mittels standardisierter Schnittstellen. Da standardisierte Formate in der Anlagensoftware akzeptiert werden, jedoch hinsichtlich der Eignung für einen zukünftigen RP/RM-gerechten Datenaustausch eher fragwürdig erscheinen, werden diese im Folgenden kurz erläutert sowie ihre Grenzen aufgezeigt. So lässt sich das VRML-Format (*Virtual Reality Modeling Language*) sehr gut für die Erzeugung farbiger Prototypen einsetzen [MiGi02], während jedoch zukünfti-

ge Anforderungen hinsichtlich der Solid-Repräsentation nicht erfüllt werden. Grund hierfür ist die Tatsache, dass dieses Format ursprünglich für weberorientierte virtuelle 3D-Welten entwickelt wurde, so dass es aufgrund der Komplexität ihrer Struktur für generative Fertigungsverfahren, insbesondere für die Schichtzerlegung, nicht optimiert ist und lediglich Flächen, jedoch nicht Körper (*Solids*) darstellen kann. Das an der Stanford Universität entwickelte PLY-Format (*Polygon File Format* auch bekannt als *Stanford Triangle Format*), welches hauptsächlich für den Austausch grafischer 3D-Objekte aus Scandaten entwickelt wurde, beschreibt ein Objekt als Sammlung von Punkten und Flächen mit gespeicherten Attributen wie Farbe, Flächennormale, Transparenz, Texturkoordinaten usw. Neben der Redundanzfreiheit und der daraus resultierenden geringen Dateigröße, gestattet dieses Format die Definition weiterer Elemente (z. B. Kanten, Zellen, Materialien). Der einfachen Dateistruktur und der Möglichkeit der Speicherung verschiedener Eigenschaften eines Polygons (hier: Dreieck) steht jedoch ein komplexes Post-Processing gegenüber. IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) stellt seit 1981 einen internationalen Standard für den Austausch von Grafikinformatoren zwischen CAD-Systemen dar. IGES deckt sowohl CSG²- als auch B-Rep³-Repräsentationen ab und wird von zahlreichen GF-Systemen akzeptiert. Dieses Format erfreut sich eines hohen Bekanntheitsgrads und enthält alle Elemente für eine exakte Repräsentation des CAD-Modells. Ein gravierender Nachteil ist jedoch eine redundante Informationsspeicherung und eine fehlende Unterstützung facettierter Darstellungen. STEP (*Standard for the Exchange of Product Data*) stellt ebenfalls einen internationalen Standard (ISO 10303) für den Austausch von Produktlebenszyklusdaten dar, d. h. neben der Beschreibung physikalischer Daten berücksichtigt dieses Format funktionale Aspekte aus allen Bereichen der Produktentwicklung [ISO94]. STEP ist ein weltweit etabliertes und bewährtes neutrales Datenaustauschformat, welches einer stetigen Weiterentwicklung unterliegt. So werden für die verschiedensten Anwendungsbereiche sogenannte Applikationsprotokolle (AP) bereitgestellt bzw. können diese aufgrund des offenen Standards angepasst und weiterentwickelt werden.

2.4.3 2¹/₂D-Schichtdatenrepräsentationen

Nach der Aufbereitung der 3D-Geometrie erfolgt die Schichtzerlegung (Slicing), d. h. die Bereitstellung der Schichtinformationen (Konturdaten, Schichtdicke, Prozessinformationen, etc.). Trotz einiger Entwicklungen von Schichtdatenformaten existiert derzeit kein Standard für diese Anwendung. Häufig wird der Slicing-Vorgang in der Front-End-Software der GF-Anlage vorgenommen, so dass der Anwender keinen Einblick in den Datenfluss erhält. Ein in der Praxis gängiges Format ist jedoch das im Rahmen eines europäischen BRITE/EURAM-Projekts entwickelte CLI-Format (*Common Layer Interface*). Dieses zielt auf eine simple, effiziente und eindeutige Darstellung der Konturdaten ab. Zusätzlich enthält das CLI-Format die Definition von Stütz- und Füllstrukturen (engl. *hatches*). Während CLI bereits in vielen GF-Systemen unterstützt wird, fehlt es hier an einer notwendigen Genauigkeit der Konturdarstellung, da CLI lediglich Polylinien unterstützt. Dies vereinfacht jedoch das Handling und die Korrektur bei fehlerbehafteten Schichtdaten. Ein häufig auftretendes Problem ist z. B. eine uneindeutige Definition von Innen- und Außenkontur. Abhilfe könnte hier das an der Helsinki

² CSG (*Constructive Solid Geometry*) ist eine Darstellungsform dreidimensionaler Objekte. Sie besteht in der Synthese beliebiger Objekte aus (i. A.) wenigen Primitiven mittels Verknüpfungsregeln (Boolesche Operatoren).

³ B-Rep (*Boundary Representation*) ist eine Darstellungsform dreidimensionaler Objekte durch die Beschreibung der begrenzenden Oberflächen bzw. deren Berandungselemente (topologische Primitive: *Vertex, Edge, Face*).

University of Technology entwickelte LEAF-Format (*Layer Exchange ASCII Format*) schaffen. LEAF kann neben den Geometriedaten (Konturdaten) auch maschinen- und prozessspezifische Informationen speichern. Neben Polylinien unterstützt es auch Bögen, so dass die Originalkontur gut approximiert werden kann. Die Struktur von LEAF erweist sich im Gegensatz zum STL-Format als sehr kompliziert, weswegen spezielle Interpreter für den Transfer zu einem GF-System notwendig sind. Zudem ist ein Konvertieren von STL in LEAF nicht möglich. Daher wird es momentan von keinem gängigen CAD- oder GF-System unterstützt. Gegenüber den offenen Schnittstellenformaten stehen die proprietären Schichtdatenformate der GF-Anlagenhersteller. Trotz diverser Unterschiede werden sie alle als SLC-Format (*Slicing Contour Format*) bezeichnet. Das SLC-Format ist eine einfache Darstellung des Bauteils und wird direkt aus den 3D-Daten generiert. Durch eine Speicherplatzreserve von 256 Byte ist es für zukünftige Anwendungen gerüstet. Jedoch stellt das SLC-Format durch die ausschließliche Unterstützung von Polylinien nur eine Approximation an das eigentliche Modell dar und lässt durch die anlagenspezifischen Zusatzinformationen keinen Austausch zwischen den GF-Systemen zu. In der Praxis ist ebenfalls nachteilig, dass die konturorientierten Datensätze nachträglich nicht mehr skaliert werden können. Dies zieht eine erneute Bearbeitung im nativen CAD-Format nach sich.

2.5 Vorbereitung des Bauprozesses

Die Vorbereitung des eigentlichen Bauprozesses umfasst vorwiegend die Orientierung und Platzierung des Bauteils im Bauraum, verfahrensabhängig die Festlegung notwendiger Stützkonstruktionen, die Generierung der Schichtinformationen anhand des Datenmodells sowie die Einstellung anlagen- und prozessrelevanter Parameter. Darüber hinaus müssen material-spezifische Verarbeitungseigenschaften besondere Berücksichtigung finden. Dies betrifft insbesondere anisotrope Materialeigenschaften wie das Schrumpf- oder auch das Verfestigungsverhalten, die einen großen Einfluss auf die Orientierung des Bauteils ausüben [WiSe09]. Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick auf die wesentlichen Schritte der Prozessvorbereitung, wie sie derzeit üblicherweise durchgeführt werden.

2.5.1 Bauteilorientierung

Der in der Praxis vorherrschende Stand der Technik sieht die Orientierung des Bauteils unter Berücksichtigung ausgewählter Kriterien vor. So wird das Modell mit Hilfe entsprechender Software virtuell im Bauraum platziert, wohingegen die Entscheidungsgrundlagen lediglich auf den Erfahrungswerten des Bedieners basieren. Eine entsprechende Wissensbasis mit Regeln für eine softwareseitige Unterstützung liegt derzeit nicht vor. So entscheidet der Anwender nach eigenem Ermessen die bestmögliche Orientierung zur Optimierung seiner zu erwartenden Ergebnisse. Je nach Vorgabe kann das Bauteil in einer Weise orientiert werden, dass z. B. eine minimale Bauzeit entsteht oder die Oberflächenqualität maximiert wird. In der Regel handelt es sich hierbei um mindestens zwei konträre Ziele. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt stellt die Ausführung von Stützkonstruktionen dar. Je nach Orientierung kann der materielle oder auch Nachbearbeitungsaufwand unterschiedlich stark ausfallen. Sehr erfahrene Anwender berücksichtigen bei der Orientierung den auftretenden Verzug und versuchen diesem durch eine entsprechende Positionierung entgegenzuwirken. Finden die

genannten Aspekte alle Berücksichtigung, so gestaltet sich die Bauteilorientierung als nicht trivial, insbesondere mit zunehmender Bauteilkomplexität. Insgesamt handelt es sich bei diesem Teilschritt der Prozessvorbereitung um eine intuitive Vorgehensweise, die jeder in Normen und Richtlinien festgehaltenen sowie abgesicherten Wissensgrundlage entbehrt.

2.5.2 Bauraumplanung

Die Anordnung mehrerer ggf. auch verschiedener Bauteile in einem Bauraum einer GF-Anlage wird als *Packing* oder auch *Nesting* bezeichnet. Die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimierte Bauraumausnutzung einer GF-Anlage und damit auch die individuelle Lage eines Bauteils hängt unmittelbar mit der Bauteilorientierung zusammen. Denn idealerweise sollten bereits bei der Ermittlung der optimierten Bauteilorientierung die Wechselwirkungen mit anderen Bauteilen im Bauraum berücksichtigt werden. Dies erfordert ein hohes Maß an Erfahrungswerten des Anwenders. Neben diesen Aspekten wird bei der Bauraumplanung ein minimales Bauvolumen angestrebt. Heutige Systeme für Anwendungen der Rapid-Technologie unterstützen im Ansatz eine automatische Platzierung der Bauteile im Bauraum unter Berücksichtigung einer maximalen Bauraumauslastung mit minimaler Bauhöhe. Hierbei handelt es sich jedoch zumeist um eine einschichtige Platzierung auf der Basis von Projektionen oder einfachen Hüllgeometrien. Dies findet vorwiegend Anwendung bei den Verfahren, die Baumaterialien ohne Stützwirkung verwenden und somit Stützkonstruktionen erfordern, die sich bis zur Bauplattform erstrecken (Abb. 2-6a). Die auf diese Weise erreichte Reduzierung der Problematik auf den 2D-Raum vereinfacht die Berechnung und garantiert die spätere Entpackbarkeit der Bauteile. Eine mehrschichtige Platzierung unterschiedlicher Bauteile ohne Stützkonstruktionen ist ebenfalls möglich. Hierbei finden jedoch die verschiedenen Bauhöhen der angeordneten Bauteile keine angemessene Berücksichtigung. Vielmehr orientiert sich die nächste Bauteileschicht an der höchsten Bauhöhe (Abb. 2-6b). Diese Platzierungsart führt zu einer ineffizienten Volumenauslastung und ist für eine wirtschaftliche Fertigung völlig ungeeignet.

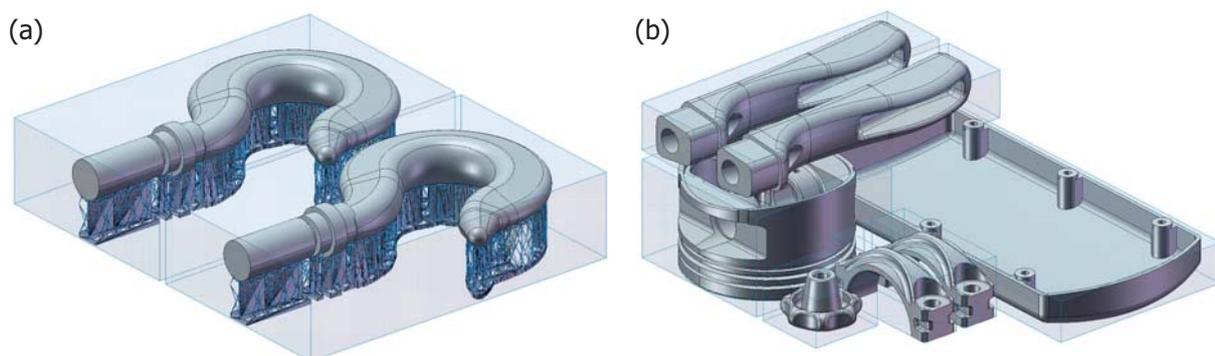


Abb. 2-6: Automatische Platzierung von Bauteilen im Bauraum

Berücksichtigt man die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Bauteilen, insbesondere die Wärmeverteilung aufgrund agglomerierter Belichtungszone, dann gestaltet sich die Verteilung der Bauteile im Bauraum sehr komplex und erfordert die Kenntnis einflussausübender Faktoren. Des Weiteren müssen bei der Bauraumaufteilung notwendige Stützkonstruktionen berücksichtigt werden. In jedem Fall muss stets die Entpackbarkeit der Bauteile gewährleistet sein. Auch hier sind Erfahrungswerte entscheidend für die Qualität der Bauraumplanung.

2.5.3 Supportgenerierung

Je nach Verfahren der Rapid-Technologie können Stützkonstruktionen (engl. *supports*) erforderlich sein, die der Fixierung des zu fertigenden Bauteils oder kritischer Bereiche während des gesamten Fertigungsprozesses in der vorgegebenen Orientierung dienen. Die abstützende Wirkung ist häufig der Hauptgrund für die Verwendung von Stützkonstruktionen bei kunststoffbasierten Verfahren. Flüssiges oder teigiges Ausgangsmaterial kann eine unzureichende Tragfähigkeit aufweisen, so dass die darüberliegenden (teil-)verfestigten Schichten durch ihr Eigengewicht verformt werden [Geb07]. Die fehlende Steifigkeit solcher Bauteile zur Verhinderung von Verformungsvorgängen liegt bei Polymerisations-Verfahren häufig an der geringen Festigkeit des Bauteils während der Fertigungsphase (sog. Grünfestigkeit). Aus diesem Grund ist die Konstruktion von Stützgeometrien zum Teil unerlässlich, um freitragende oder überkragende Bauteilbereiche ab einem definierten Grad des Überhangs bzw. Neigungswinkels (ca. $42 - 45^\circ$) zu stützen und zu fixieren. Ein weiteres Einsatzgebiet von Stützgeometrien ist die Fixierung von sogenannten „schwebenden“ Komponenten (engl. *floating components*). Hierbei handelt es sich um Bereiche, die erst ab einer Schicht n (mit $n > 0$) gefertigt werden und dabei noch keinen Kontakt zur übrigen Geometrie aufweisen, sondern sich erst im weiteren Fertigungsverlauf mit dem restlichen Bauteil verbinden. Die Notwendigkeit zur Fixierung auf die Bauplattform ist ebenfalls gegeben, wenn sich das Bauteil in einer instabilen Lage befindet. Die Stützen verhindern in diesem Fall, dass das Bauteil durch Transportwalzen oder Wischersysteme infolge einer durch Verzug verursachten Kollision aus seiner ursprünglichen Lage verschoben wird. Bei zahlreichen Verfahren finden Stützkonstruktionen auch ihren Einsatz zur Separation des Bauteils von der Bauplattform. Dies vereinfacht die sichere Entfernung des Bauteils nach dem Fertigungsprozess und erleichtert die prozessseitige Steuerung der Schichtstärke sowie Oberflächenqualität der ersten Schichten. Einen Überblick über die Verwendung von Supports bietet Abb. 2-7.

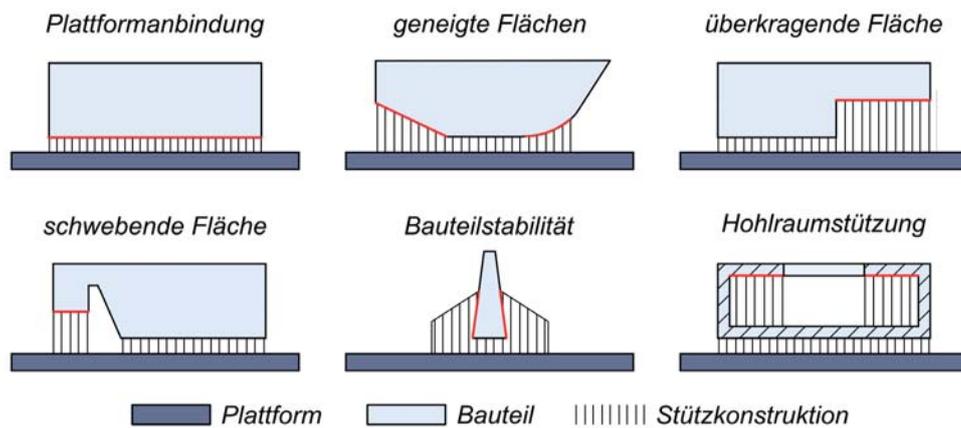


Abb. 2-7: Einsatzmöglichkeiten von Stützkonstruktionen

Weiterhin kann es erforderlich sein, das Bauteil auf die Bauplattform zu ziehen. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn Bauteile mit großflächigen Querschnitten aufgrund von Schrumpfungsvorgängen zum Abheben (Bimetall-Effekt) bzw. Aufrollen (sog. *Curling*) neigen. Die angreifenden Supports wirken somit den inneren Spannungen entgegen und verhindern einen Bauteilverzug. Bei metallischen Werkstoffen können Stützkonstruktionen zudem für eine größere Wärmeabfuhr sorgen und somit ebenfalls die Gefahr von Verzug minimieren. Dies ist in der Regel daher auch der primäre Verwendungszweck von Stützkonstruktionen bei metallbasierten Verfahren. Die allgemeine Supportgenerierung erfolgt für eine

vorgegebene Orientierung softwarebasiert und kann vom Anwender jederzeit an besondere Randbedingungen angepasst werden, da eine Vielzahl unterschiedlicher Ausführungen möglich ist. Dies kann jedoch auch dazu führen, dass dieser Teilschritt eine Neuorientierung des Bauteils nach sich zieht. Somit gestalten sich die Teilaufgaben der Bauteilorientierung und Supportgenerierung häufig zu einem iterativen Prozess.

2.5.4 Schichtzerlegung

Der gesamte generative Fertigungsprozess besteht prinzipiell aus der Erzeugung von Schichtdaten der Geometrie, der Ermittlung der Pfade für das Laser-Scanning bzw. für den Materialauftrag, dem eigentlichen Geometrieaufbau und dem anschließenden Post Processing. Die geometrischen Schichtinformationen lassen sich prinzipiell mit zwei verschiedenen Verfahren erzeugen. Das erste Verfahren sieht die Schichtzerlegung an einem Facettenmodell vor. Hierfür muss ggf. ein CAD-Modell tesseliert und in ein für facettierte Modelle geeignetes Datenformat (z. B. STL, VRML, PLY, CFL u. a.) überführt werden. Die Ermittlung der Schichtkonturen basiert in diesem Fall hauptsächlich auf der Berechnung von Schnittkurven zwischen einer Schnittebene und den einzelnen (ebenen) Facetten des Modells. Die einfache mathematische Beschreibung rechtfertigt den Zwischenschritt über ein Facettenmodell, wird jedoch auch mit einer Approximation der Originalgeometrie erkauft. Ein alternatives Verfahren vollzieht die Schichtzerlegung direkt an einem CAD-Modell. Auf diese Weise erreichen die Konturen eine höhere Genauigkeit. Der Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch die hohe Komplexität der Konturgenerierung und der damit verbundene Aufwand. Die ermittelten Konturen der einzelnen Bauschichten dienen schließlich der Bestimmung der Steuerparameter einer generativen Fertigungsanlage (GF-Anlage). Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Wahl der Schichtdicke für die Schichtzerlegung stets einen Kompromiss zwischen Oberflächenqualität und Wirtschaftlichkeit darstellt. Eine zunehmende Schichtdicke führt insbesondere bei geneigten Flächen, Rundungen und filigranen Strukturen zu einer Verstärkung des Treppeneffekts (siehe Abb. 2-8). Größere Schichtstärken führen jedoch zu weniger Schichten, so dass die Bauzeit und die damit verbundenen Baukosten verringert werden. Die geeignete Wahl stellt eine Herausforderung dar und basiert überwiegend auf Erfahrungswerten geübter Anwender.

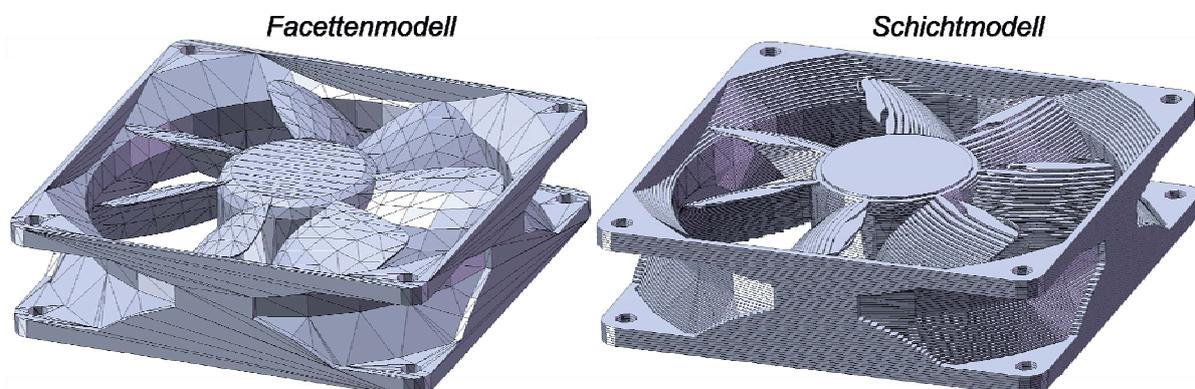


Abb. 2-8: Stufeneffekt am Beispiel eines Lüfters

2.5.5 Einstellparameter

Nachdem alle geometrischen Informationen des zu fertigenden Bauteils vorliegen, müssen anlagenspezifische Parameter festgelegt werden. Neben der geeigneten Bauteilorientierung entscheiden diese Prozessparameter oft in wesentlichem Maße über die Qualität des zu fertigenden Bauteils. Folgende Auswahl an Prozessparametern muss neben weiteren Stellgrößen im Rahmen der Prozessvorbereitung festgelegt werden:

- Schichtstärke,
- Verfahrensgeschwindigkeiten,
- Bauraumtemperatur,
- Laserleistung,
- Strahldurchmesser,
- Scan-/Hatchstrategie,
- etc.

Exemplarisch sei hier die Sicherstellung der geforderten Maßhaltigkeit genannt. Maßnahmen zur Schrumpfkompensation können in angemessener Weise das Schrumpfverhalten des Materials berücksichtigen. Dies bedeutet in der Regel eine entsprechende Skalierung des Modells vor der Schichtzerlegung bzw. die Skalierung der Belichtungs-Scanvektoren. Da die Schrumpfkompensation grundsätzlich auf Erfahrungswerten basiert, kann eine gesicherte Aussage über das erreichbare Resultat ohne Simulation des Bauprozesses nicht getroffen werden. Die Auswahl einer geeigneten Belichtungsstrategie stellt einen weiteren wesentlichen Bestandteil der Prozessvorbereitung dar. Hierbei werden die Schichtinformationen in anlagen- und prozessspezifische Steuerinformationen umgesetzt, also die Lage der Laserpfade (SLA, SLS, SLM) bzw. der Materialauftragspfade (FLM, MJM, 3DP u. Ä.) festgelegt (sog. *Scanning*) und die Abstände zwischen den Pfaden (*Hatching*) eingestellt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Einstellung der Prozessparameter ein hohes Maß an Erfahrungswissen erfordert. Entsprechende Softwarewerkzeuge verfügen zum Teil über Möglichkeiten einer (teil-)automatisierten Parametereinstellung. Eine geschlossene Wissensbasis, auf die entsprechend zurückgegriffen werden könnte, liegt jedoch derzeit nicht vor.

2.6 Bauprozess und Post Processing

Die im Rahmen der Schichtzerlegung ermittelten Schichtkonturen liefern die Grundlage zur Erzeugung der physikalischen Bauteilschichten. Dieser Prozess läuft im Wesentlichen in zwei Teilschritten ab. Während der erste Schritt das Generieren einer Schicht in der xy-Ebene des Bauraums vorsieht, wird im zweiten Schritt die erzeugte Schicht mit der vorhergehenden (in z-Richtung) verbunden. Je nach Verfahren können diese Teilschritte sequenziell oder simultan ablaufen. Die Vielzahl der Verfahren ergibt sich durch die Anwendung verschiedener Wirkprinzipien zum Fügen der Einzelschichten. Die angewendeten physikalischen Effekte lassen sich dabei nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials einteilen [Geb07]:

- Generieren aus der flüssigen Phase,
- Generieren aus der festen Phase,
- Generieren aus der gasförmigen Phase.

Die Kenntnis der zugrunde gelegten Wirkprinzipien ist notwendig für das allgemeine Prozessverständnis sowie die sich hieraus ableitbaren Anforderungen an eine computergestützte Optimierung der Bauteilorientierung unter Berücksichtigung prozessrelevanter Aspekte. Eine detaillierte Beschreibung der physikalischen Prinzipien und ihrer industriellen Umsetzungen findet sich im Anhang. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei den für die Praxis relevantesten Verfahren gewidmet. Verfahren zur Generierung aus der Gasphase finden in dieser Arbeit keine Berücksichtigung, da sie industriell nur sehr aufwändig umzusetzen und für zweidimensionale Strukturen, jedoch nicht für den Aufbau komplexer 3D-Geometrien, optimiert sind.

Generative Fertigungsverfahren erfüllen, trotz ihrer zahlreichen Einstellparameter zur Steuerung der Bauteilqualität, nicht immer die gestellten Anforderungen hinsichtlich Optik, Haptik und gegebenenfalls Festigkeit. Gerade der verfahrensbedingte Treppenstufeneffekt erfordert eine Nachbearbeitung der Bauteile bei bestehenden Anforderungen an die Oberflächenqualität. Daher kommen nach dem Bauprozess häufig Folgetechnologien zur Verbesserung der Modelleigenschaften zum Einsatz. Grundsätzlich ist hier zwischen der Nachbehandlung von Kunststoff- und Metallprodukten zu unterscheiden. Während zur Verbesserung der Oberflächenqualität von Kunststoffprodukten verschiedene Schleifverfahren Anwendung finden, werden bei Metallprodukten gängige spanende Verfahren des Finishings angewendet (Fräsen, Schleifen, Polieren, Erodieren). Zur Veränderung physikalischer oder mechanischer Eigenschaften finden Infiltrationsverfahren ihren Einsatz. Die Palette der eingesetzten Verfahren zur Nachbehandlung reicht vom Lackieren bis hin zur Beschichtung mit dem Ziel der Oberflächenveredelung oder zur Steigerung der Bauteilbeständigkeit gegenüber aggressiven Medien. Der mit dem Post Processing verbundene zeitliche sowie finanzielle Aufwand hängt stark von der Bauprozessvorbereitung und somit von der Erfahrung des Anwenders ab. Insbesondere die geschickte Orientierung des Bauteils kann die erforderliche Nachbearbeitung erheblich reduzieren. Somit ist unter anderem auch dieser Aspekt ein Ziel der multikriteriellen Optimierung der Bauteilorientierung, das es in dieser Arbeit zu erreichen gilt.

3 Konzeption der Orientierungsoptimierung

3.1 Potenziale und Grenzen der Rapid-Technologie

Eine disziplinübergreifende Betrachtung der physikalischen Wirkprinzipien der jeweiligen generativen Verfahren und ihrer industriellen Umsetzungen gestattet die Ableitung von Potenzialen und Grenzen der Rapid-Technologie. Während die Nutzungsmöglichkeiten zum Teil durch das technisch Machbare begrenzt werden, führt die bis dato nicht zufriedenstellende Kenntnis der auftretenden Wechselwirkungen zur Limitierung der Einsatzpotenziale. Im Folgenden sollen diese Grenzen und Defizite gegenüber den Vorteilen der Technologienutzung näher beleuchtet werden. Dabei lassen sich die begrenzenden Faktoren in die folgenden Kategorien einteilen:

- Bauteilqualität,
- Werkstoff,
- Konstruktion,
- Datenqualität,
- technische Umsetzung und
- Wirtschaftlichkeit.

Die folgenden Ausführungen zu den Potenzialen und Grenzen beziehen sich auf die industriell wichtigsten generativen Verfahren, ohne jedoch einzelne Anwendungen hervorzuheben.

BAUTEILQUALITÄT

Eine erhebliche Einschränkung der Technologienutzung stellt der verfahrensbedingte Treppenstufeneffekt dar, der den größten Einfluss auf die Oberflächenqualität ausübt. Das Prinzip der schichtweisen Fertigung führt zu Formabweichungen, insbesondere wenn der Neigungswinkel der Flächen gegenüber der Baurichtung (z-Richtung) große Werte annimmt. Dieser Effekt lässt sich bei Verfahren mit flüssigem Ausgangsmaterial durch alternative Belichtungs- oder Recoating-Mechanismen geringfügig reduzieren [Hag00], [ReCo97]. Bei pulverbasierten Verfahren kann die Reduzierung der Korngröße des Ausgangsmaterials Abhilfe schaffen, da mit Hilfe kleinerer Korngrößen geringere Schichtdicken erreicht werden können. Weitere Maßnahmen betreffen die Strategie der Schichtzerlegung (z. B. *Adaptive Slicing*). Grundsätzlich jedoch kann verfahrensübergreifend mit Hilfe einer geeigneten Bauteilorientierung der Grad des auftretenden Treppenstufeneffekts beeinflusst werden, wobei hierzu eine umfassende Kenntnis aller weiteren Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität notwendig ist. Dies gilt besonders für auftretende Zielkonflikte wie hohe Oberflächenqualität bei gleichzeitig guter Wirtschaftlichkeit. Neben dem Treppenstufeneffekt tragen eventuell auftretende Materialanhaftungen an den Bauteiloberflächen zur Verschlechterung der Oberflächenqualität bei. Dies

kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen ist dieser Effekt besonders bei laserbasierten Verfahren mit größeren Bauteilüberhängen und schwebenden Flächen zu beobachten. Die parabelförmige Wärmeverteilung in z-Richtung (Baurichtung) sowie die radiale Ausbreitung der Schmelzzone in der Schichtebene führen zu einer ungleichmäßigen Verfestigung des Ausgangsmaterials und somit zu Unregelmäßigkeiten in der Oberflächengeometrie der nach unten gerichteten Flächen [Zäh06]. Insbesondere bei Polymerisations-Verfahren, die eine mit Overcure (vgl. *Laser-Scanner-Verfahren* im Anhang) eingestellte Belichtung zur Verfestigung adjazenter Schichten verwenden, führt eine fehlende unten liegende Schicht zum sogenannten *Print-Through*, also einer Teilaushärtung des flüssigen Materials (Abb. 3-1). Daher weisen nach unten gerichtete Flächen (engl. *down facing areas*) häufig eine schlechtere Oberflächenqualität auf als solche, die nach oben gerichtet sind (engl. *up facing areas*).

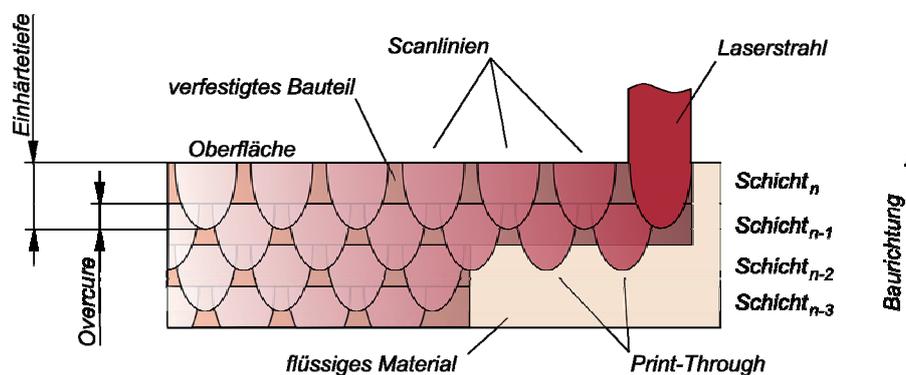


Abb. 3-1: Print-Through-Effekt bei Polymerisations-Verfahren

Eine weitere Ursache für Materialanhaftungen ist bei pulverbasierten Verfahren durch eine inhomogene Wärmeleitung begründet. Die eingebrachte Energiemenge wird während des Prozesses als Wärme unterschiedlich gut abgeführt. Im Gegensatz zur hohen Wärmeleitung in verfestigten Bereichen, sorgt die deutlich geringere Wärmeleitung im losen Pulverbett für Anhaftungen einzelner Pulverpartikel in den Grenzregionen (siehe Abb. 3-2). Dieser Effekt tritt ebenfalls verstärkt bei nach unten gerichteten Flächen auf.

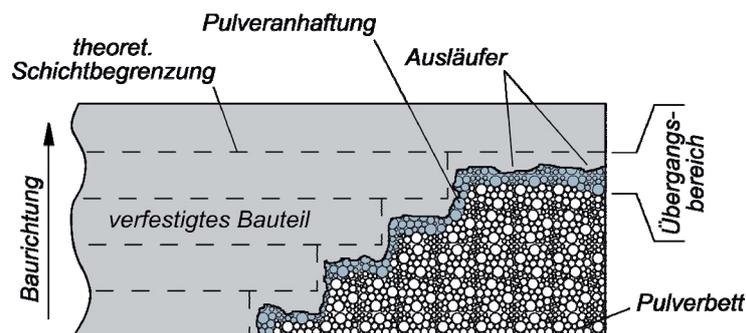


Abb. 3-2: Pulveranhaftung infolge inhomogener Wärmeleitung (in Anl. an [Seh10])

Einen mit der Oberflächenqualität einhergehenden Faktor stellt der materialspezifische Verzug dar. Aufgrund des bei den greifenden Wirkprinzipien notwendigen Wärmeeintrags kommt es im Bauteil zu thermisch induzierten Spannungen. Diese lassen sich verfahrenstechnisch meist kaum vermeiden. In der Regel kann diesem Umstand aber durch eine adäquate Bauteilorientierung oder eine entsprechende Prozessregelung entgegengewirkt wer-

den. Aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich zudem mit der Simulation und Optimierung des Temperaturfelds auf Basis verschiedener Scanstrategien [Zäh07]. Eine weitere mechanische Eigenschaft, die resultierende Festigkeit des generativ hergestellten Bauteils, trägt zur Gesamtbeurteilung der Bauteilqualität bei. In der Regel treten in den Schichtebenen die höchsten Festigkeiten auf. Die mechanische Beanspruchbarkeit senkrecht zu den Schichten fällt demzufolge geringer aus. Bei einigen Verfahren können diese Beanspruchungen sogar zur Delamination einzelner Schichten und somit zum gesamten Bauteilversagen führen. Daher muss der angestrebte Kraftfluss in den im Sinne des Rapid Tooling oder Rapid Manufacturing gefertigten Bauteilen in die Bauteilorientierung einfließen. Dies erfordert ein höchstes Maß an Erfahrungswerten.

WERKSTOFF

Die fehlende Breitenwirksamkeit der generativen Fertigungsverfahren basiert unter anderem auf einem eingeschränkten Werkstoffspektrum. Während technisch gesehen neue Materialien, insbesondere Keramiken und metallische Werkstoffe, durchaus verarbeitbar geworden sind, fehlt es zum flächendeckenden Einsatz an entsprechenden Material-Qualifizierungen. Hierfür fehlen derzeit noch die dafür notwendigen Erfahrungen aus der Praxis. Diese könnten jedoch zukünftig den Einsatzbereich der Technologie zunehmend auf die Luft- und Raumfahrt sowie weitere Bereiche der Medizin ausweiten. Gerade die Zahl medizinischer Anwendungen (z. B. Orthopädie, Dentaltechnik, Tissue Engineering⁴) ist bereits in den letzten Jahren stark gestiegen, so dass abgesicherte mechanische Eigenschaften der Werkstoffe die weitere Erschließung dieser Anwendungsfelder begünstigt. Generative Fertigungsanlagen verwenden noch zum Teil proprietäre Werkstoffe, die zu erhöhten Anschaffungskosten führen [GBB02]. Abhilfe könnten die aktuellen Trends zu metallischen Pulvern aus handelsüblichen Metalllegierungen schaffen [WiWi09], [Zäh06]. Die in der Zukunft zu erwartende Ölversorgungslücke wird die Preisentwicklung für klassische Kunststoffe stark beeinträchtigen. Da bei den meisten generativen Verfahren Kunststoffe als Ausgangsmaterial zum Einsatz kommen, müssen zur Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit alternative Materialien gefunden werden. Daher rücken Agrarrohstoffe vermehrt in den Mittelpunkt, so dass zunehmend die Entwicklung biokompatibler Kunststoffe für den RP/RM-Einsatz vorangetrieben wird [Tan05].

KONSTRUKTION

Die derzeit noch auftretenden Restriktionen der Rapid-Technologie führen dazu, dass diese bereits im Konstruktionsprozess Berücksichtigung finden müssen. Insbesondere im Sinne des Rapid Manufacturing hergestellte Bauteile mit Fertigteilecharakter bedürfen spezieller Gestaltungsrichtlinien. Ansätze zur RP/RM-gerechten Gestaltung funktionaler Prototypen im Konstruktionsprozess finden sich in [DaKö06]. Zu erwähnen ist beispielsweise der bei vielen Verfahren auftretende Schwund, der durch Skalierung oder lokale Aufmaße konstruktiv beachtet werden sollte. Zudem muss die Zugänglichkeit eventuell notwendiger Nachbearbeitungsflächen oder die Entfernbareit nichtverfestigten Materials und ggf. vorliegender Supports gewährleistet sein. Hierzu sind abgeschlossene Hohlräume am Bauteil zu vermeiden. Dies gilt besonders für die vermehrt auftretenden Bauteile mit konturnahen Kühlkanälen (engl. *conformal cooling*), die sich die Gestaltungsfreiheit der Rapid-Technologie zunutze machen. Ein

⁴ Als Tissue Engineering wird die Gewebekonstruktion in der regenerativen Medizin bezeichnet. Die Rapid-Technologie wird hier zur Generierung von Strukturgerüsten (engl. *scaffold*) zur Gewebeaufnahme eingesetzt.

weiterer Vorteil der generativen Fertigungsverfahren ist die Integration funktioneller Strukturen in die Bauteilgeometrie. So lassen sich flexible Komponenten (Filmscharniere, Federn, etc.) oder bewegliche Verbindungen (Stiftscharniere, Gelenke, Schnappverbindungen u. a.) in einem Fertigungsprozess herstellen. Hierzu müssen jedoch Bohrungen, Rundungen, Spaltmaße usw. aufgrund einer technisch begrenzten Auflösung auf Erfahrungswerten basierende Mindestwerte aufweisen. Ein weiterer Aspekt, den es bereits in der Konstruktionsphase zu beachten gilt, betrifft die Speicherung von Farb- und Texturinformationen. Einige 3D-Druck- sowie Extrusions-Verfahren bieten aufgrund eingefärbter Bindemittel oder verschiedenfarbiger Ausgangsmaterialien die Möglichkeit der Farbgebung ausgewählter Bauteilbereiche. Die entsprechenden Flächen sind somit bereits im digitalen Modell zu kennzeichnen und über entsprechende Schnittstellen als Schichtinformation abzuspeichern. Dies gilt ebenfalls für Multi-Material-Bauteile (z. B. Kunststoffbauteile mit integrierten elektrischen Schaltkreisen). Die hier angesprochenen Aspekte sind ebenfalls bei der Bauteilorientierung zu berücksichtigen und erfordern demzufolge die Möglichkeit der Kennzeichnung von Flächen oder Bauteilbereichen, die besondere Produkteigenschaften (Funktions- bzw. Designfläche mit erhöhten Qualitätsanforderungen, Farbe, Material, etc.) aufweisen sollen. Dies stellt eine wesentliche Forderung an eine zukunftsorientierte Datenqualität dar.

DATENQUALITÄT

Die Datenqualität der zu übertragenden Informationen innerhalb der Prozesskette muss für zukünftige Anwendungen verbessert, d. h. der Informationsgehalt erweitert werden. Der De-facto-Standard STL genügt bereits zu diesem Zeitpunkt nicht den Anforderungen, die an das Datenformat gestellt werden, so dass Bestrebungen für eine RP/RM-gerechte Schnittstelle vonnöten sind. Die Übertragung semantischer Informationen (z. B. Produkt- oder Flächeneigenschaften) nebst reiner Geometrie an die GF-Anlage stellt eine Schließung der derzeit bestehenden Lücke in der CAD-RP/RM-Kette dar. Erst die Auswertung dieser zusätzlichen Informationen gestattet die Absicherung der Konstruktionsabsichten im Rapid-Technologie-Prozess. So lassen sich lokal abweichende Eigenschaften eines heterogenen Bauteils für die technische Umsetzung erfassen und bei der Bauteilorientierung berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für Bauteile mit Endproduktcharakter, die zunehmende On-Demand-Fertigung personalisierter Produkte sowie für Bauteile mit deutlich zunehmender Komplexität wie z. B. bei Anwendungen des Tissue Engineering [Sun05], [BCG06].

TECHNISCHE UMSETZUNG

Bei laserbasierten Verfahren kommen in der Regel Ablenkensysteme zum Einsatz, die die Position des Laserstrahls innerhalb der Bauebene steuern. Diese Systeme sind naturgemäß massebehaftet und somit in ihrer Verfahrensgeschwindigkeit limitiert. Daher sind der Baugeschwindigkeit technische Grenzen gesetzt, die sich nur durch eine stetige Form- und Materialoptimierung der Spiegeleinheiten verschieben lassen. Ein weiterer limitierender Faktor stellt die Leistung eingesetzter Laser dar. Zur Erhöhung der Baugeschwindigkeit müsste insbesondere bei hoch schmelzenden metallischen oder keramischen Ausgangsstoffen die Laserleistung deutlich erhöht werden. Dies hätte nicht nur einen sprunghaften Anstieg der Anlagenkosten zur Folge, sondern würde auch eine notwendige Kühlung der Galvo-Spiegel nach sich ziehen [Zäh06]. Aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich mit dem Einsatz von Elektronenstrahlen als Alternative zum Laser. Diese neue Energiequelle könnte die genannten Restriktionen größtenteils aufheben.

WIRTSCHAFTLICHKEIT

Beim Einsatz generativer Fertigungsverfahren ist auf operativer Ebene stets zu entscheiden, welches zur Verfügung stehende Verfahren optimale Ergebnisse bei möglichst geringen Kosten liefert. Ausgehend von der Prämisse, dass das geeignete Verfahren eingesetzt wurde, gilt es schließlich die Prozessvorbereitung zur Minimierung der Herstellungskosten zu optimieren. Die Fertigungskosten je Bauteil sind komplexitäts- jedoch nicht völlig stückzahlunabhängig. Während der Fixkostenanteil unabhängig von der Prozessvorbereitung gebildet wird, bestimmen die Baukosten als variable Größe in maßgeblichem Umfang die Wirtschaftlichkeit des Bauprozesses (Abb. 3-3).

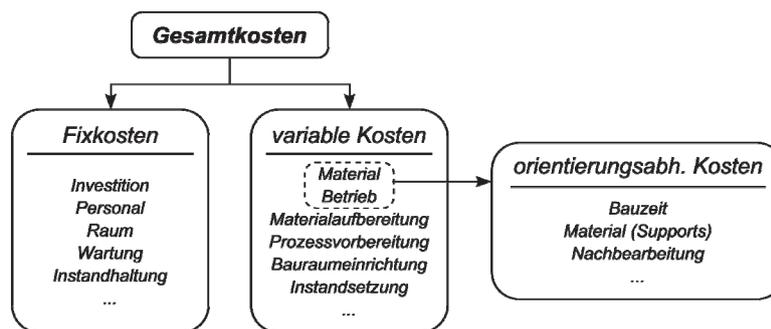


Abb. 3-3: Zusammensetzung der Fertigungskosten

Der orientierungsabhängige Anteil setzt sich aus der Bauzeit (Anzahl der zu fertigenden Schichten), dem Materialverbrauch für gegebenenfalls notwendige Supports und dem Aufwand für eine mechanische/chemische Nachbearbeitung im Rahmen des Post Processing zusammen. Diese Einflussgrößen können durch eine optimierte Bauteilorientierung minimiert werden. Darüber hinaus steht die für die Wirtschaftlichkeit wichtige Bauraumausnutzung in engem Zusammenhang mit der Orientierung der Bauteile.

Die hier aufgeführten Potenziale und Grenzen der Rapid-Technologie verdeutlichen die Notwendigkeit einer optimierten Prozessvorbereitung, insbesondere die Berücksichtigung der Einflussparameter und ihrer Wechselwirkungen. Die rechnergestützte Ermittlung einer geeigneten Bauteilorientierung als wesentlicher Bestandteil der Prozessvorbereitung kann wie dargestellt zahlreiche verfahrensimmanente Einschränkungen der Technologienutzung herabsetzen oder sogar aufheben. Daher werden im folgenden Abschnitt die aus den limitierenden Einflussgrößen ableitbaren Anforderungen an die Bauteilorientierung formuliert.

3.2 Anforderungen an die Bauteilorientierung

Physische Prototypen stellen eine wichtige Grundlage für die Bewertung eines Entwicklungsstandes dar. Sie vereinen Teilergebnisse des Produktentwicklungsprozesses in einem Verifikationsobjekt und gestatten die Aus- und Bewertung der mit den Produkthanforderungen verknüpften Qualitätsmerkmale. Mit zunehmendem Fortschritt im Entwicklungsprozess und dem simultan ansteigenden Detaillierungsgrad des Produkts sowie dem einhergehenden Anwachsen der Anforderungsliste nimmt die Zahl qualifizierbarer Qualitätsmerkmale und damit die Planungssicherheit zu [Geu96]. Die in den jeweiligen Phasen der Produktentwicklung definierten zweckgebundenen Zielsetzungen ziehen unterschiedlichste Anforderungskriterien der

Verfahrensauswahl, der Prozessführung und letztendlich der Bauteilorientierung als Bestandteil der Prozessvorbereitung nach sich. Anforderungen können dabei gestalterische Aspekte (Oberfläche, Transparenz, Haptik u. a.), geometrische Aspekte (Maßhaltigkeit, Schwindungsverhalten, etc.) oder weitere Eigenschaften wie Zerspanbarkeit, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit usw. berücksichtigen. Einen Überblick über Qualitätsmerkmale physischer Verifikationsobjekte und die Relevanz der damit einhergehenden spezifischen Anforderungen liefert Tab. 3-1. Die Berücksichtigung der genannten Anforderungen beschränkt sich jedoch nicht auf die Herstellung von Prototypen. Digitale Modelle, die im Sinne des Rapid Manufacturing mit Hilfe generativer Fertigungsverfahren zu marktfähigen Produkten mit Eideigenschaften gelangen sollen, setzen ebenfalls die Einbeziehung der notwendigen Anforderungskriterien bereits in der Konstruktionsphase voraus. Denn ein auf diese Weise gefertigtes Bauteil stellt eine identische Abbildung des Endprodukts mit allen geforderten Qualitätsmerkmalen dar.

Tab. 3-1: Qualitätskriterien für Prototypen (in Anl. an [VDI07])

Kriterienkategorie	Konzeptmodell	Geometrie-prototyp	Funktions-prototyp	Technischer Prototyp	Produkt
Geometrische Größen (Maße, Geometrie, Winkel, Oberfläche, ...)	+	+++	++	++	+++
Mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Härte, Dehnung, ...)	○	+	++	+++	+++
Materialeigenschaften (Gewicht, Porosität, Leitfähigkeit, Isotropie, Temperaturbeständigkeit, ...)	○	○	++	+++	+++
Verarbeitungseigenschaften (Schweiß-, Zerspan-, Beschicht-, Lackierbarkeit, ...)	○	+	++	+++	+++
Anmutung (Form, Optik, Haptik, Textur, Farbe, ...)	+++	++	+	++	+++
Wirtschaftlichkeit (Baukosten, Nachbearbeitung, Lieferzeit, ...)	+++	++	+	++	+++

Anforderung: ○ nicht vorhanden + gering ++ mittel +++ hoch

Nicht alle hier aufgelisteten Anforderungskriterien wirken sich unmittelbar auf die Orientierung des herzustellenden Bauteils aus. Dennoch gilt es einige wichtige Kriterien bei der Wahl einer geeigneten Orientierung zu berücksichtigen. Gerade aufgrund des schichtweisen Fertigungsablaufs und des daraus resultierenden anisotropen Charakters zahlreicher Bauteileigenschaften wirken sich ungünstige Orientierungen negativ auf die Bauteilqualität aus. Insbesondere Güteigenschaften des Produkts bzw. der Prozessführung, wie Oberflächenqualität, Maßhaltigkeit, Aufwand für die Nachbearbeitung und Wirtschaftlichkeit, sind in erheblichem Maß von der gewählten Bauteilorientierung abhängig. Daher erhalten diese Anforderungskriterien im Folgenden besondere Aufmerksamkeit. Anhand der in Abschnitt 3.1 aufgezeigten Potenziale der Rapid-Technologie, die durch eine regelbasierte Unterstützung zur Optimierung der Bauteilorientierung erschlossen werden könnten, lassen sich die für das Optimierungskonzept notwendigen Anforderungen formulieren. Einen Überblick über die bei der Orientierung des Bauteils zu beachtenden Qualitätskriterien liefert Abb. 3-4.

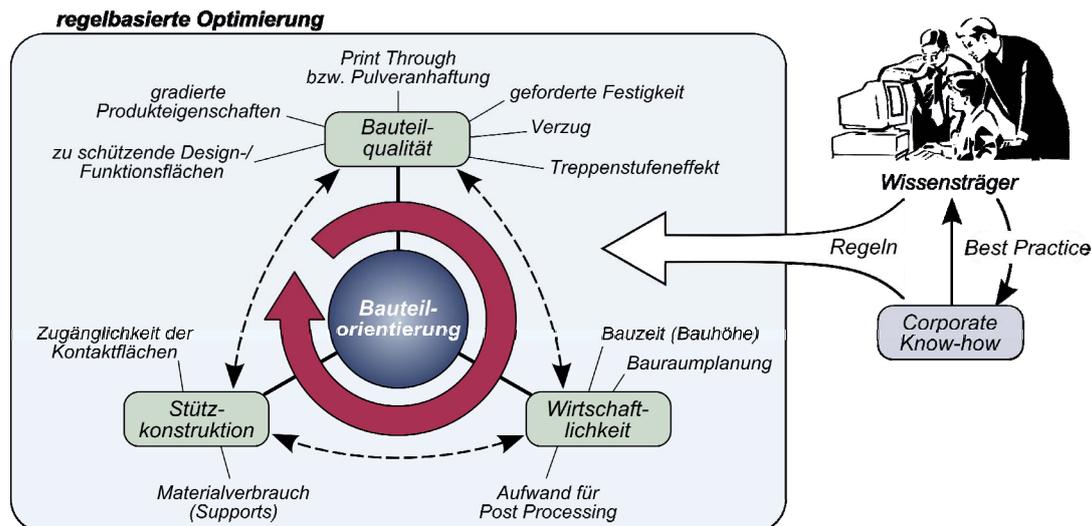


Abb. 3-4: Zusammenhänge orientierungsabhängiger Produkt- und Prozesseigenschaften

BAUTEILQUALITÄT

Hinsichtlich der Bauteil- bzw. Oberflächenqualität ist bei der Orientierung des Bauteils darauf zu achten, dass der Treppenstufeneffekt gering ausfällt, d. h. die Flächennormalen möglichst senkrecht oder exakt parallel zur Horizontalen (Plattformebene) ausgerichtet sind. Je weniger die Flächen von der Horizontalen ausgelenkt werden, desto stärker kommt der Treppenstufeneffekt zum Tragen. Zusätzlich sollten, sofern die Anlage dies unterstützt, adaptive Schichtzerlegungsansätze angewendet werden. Dies ermöglicht eine gute Oberflächenqualität bei ansonsten für eine uniforme Schichtzerlegung ungünstigen Orientierungen. Ebenso dürfen ebene Flächen mit besonderen Qualitätsanforderungen (z. B. Design- oder Funktionsflächen) aufgrund der Gefahr des *Print Through* bzw. der Pulveranhaftung nicht nach unten weisen. Einhergehend mit der Oberflächengüte muss die Maßhaltigkeit des Bauteils gewährleistet werden. Dies wird durch die Anwendung der adaptiven Schichtzerlegung erreicht. Die Vermeidung von Verzug leistet ebenfalls einen Beitrag zur Sicherstellung der Bauteilqualität. Da in der Praxis auf diesem Gebiet noch wichtige Erkenntnisse zur Formulierung von Regeln fehlen, sind solche Orientierungen zu vermeiden, die einen potenziellen Verzug nach sich ziehen könnten. Dies tritt insbesondere bei großflächigen Belichtungsflächen sowie plötzlich auftretenden Querschnittssprüngen auf. Grundsätzlich ist die Festigkeit des Bauteils von der Orientierung abhängig und sollte im Rahmen der Prozessvorbereitung berücksichtigt werden. Da derzeit die Möglichkeiten zur Festlegung des geforderten Kraftflusses im Datenmodell fehlen, ist dieser Aspekt nicht Bestandteil der in dieser Arbeit angestrebten Optimierung. Eine erfolgreiche Attributierung von Flächen vorausgesetzt, sind bei der Orientierung auch geforderte Produkteigenschaften zu berücksichtigen. Diese Attribute können Informationen bzgl. gradierter Eigenschaften beinhalten oder auch die Kennzeichnung vor Supports zu schützender Design-/Funktionsflächen darstellen.

STÜTZKONSTRUKTION

Bei generativen Verfahren, die den Einsatz von Stützkonstruktionen erfordern, ist stets die Fixierung des Bauteils während des Bauprozesses zu gewährleisten. Dies beinhaltet sowohl das Abstützen „schwimmender“ Schichten als auch die Sicherstellung der Stabilität des Bauteils zu jedem Zeitpunkt. Des Weiteren sollte bei der Orientierung der für die Stützen erforder-

derliche Materialverbrauch berücksichtigt und minimiert werden. Um die Stützkonstruktionen nach dem Bauprozess erfolgreich und mit möglichst geringem Aufwand entfernen zu können, muss die Zugänglichkeit der Kontaktflächen zwischen Bauteil und den angreifenden Supports bestehen. Während sich bei einigen Verfahren die Stützstrukturen auswaschen lassen, muss ansonsten entsprechendes Werkzeug zum Entfernen angewendet werden können.

WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die Wirtschaftlichkeit des generativen Fertigungsprozesses sollte in einem gesunden Verhältnis zum gefertigten Bauteil stehen. Daher ist bei der Bauteilorientierung die orientierungsabhängige Bauhöhe bzw. die unter Einbeziehung der eingestellten Prozessparameter (z. B. Verfahrensgeschwindigkeit, Laserleistung, u. dgl.) aufzuwendende Bauzeit und gleichermaßen der notwendige Aufwand für das Post Processing zu minimieren. Eine Nachbearbeitung ist in der Regel erforderlich, wenn Stützkonstruktionen entfernt werden müssen oder die Oberfläche mit dem Ziel der Oberflächenverbesserung (z. B. Beständigkeit, Veredelung, etc.) nachbehandelt wird. Einhergehend mit der Variation der Bauteilausrichtung kann zudem der Materialaufwand für Stützkonstruktionen zu einem Anstieg der Materialkosten führen. Ein weiterer Aspekt der Wirtschaftlichkeit stellt die Bauraumplanung dar. Diese steht im engen Verhältnis zur Bauteilorientierung und erfordert die Berücksichtigung der genannten Anforderungen sowie der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Bauteilen. Da auch auf diesem Gebiet noch grundlegend Erfahrungswissen fehlt, insbesondere bzgl. der thermischen Wechselwirkungen, beschränkt sich das vorgestellte Konzept für die Berücksichtigung der Bauraumplanung auf rein wirtschaftliche Gesichtspunkte. Eine optimale Bauraumausnutzung führt zu einer kompakten Bauteilanordnung, die nur durch das räumliche „Ineingreifen“ von Bauteilen ermöglicht werden kann (Abb. 3-5a). Dies lässt sich jedoch nur durch die Substitution der hüllkörperbasierten Platzierung durch eine objektbasierte Bauraumaufteilung realisieren (Abb. 3-5b).

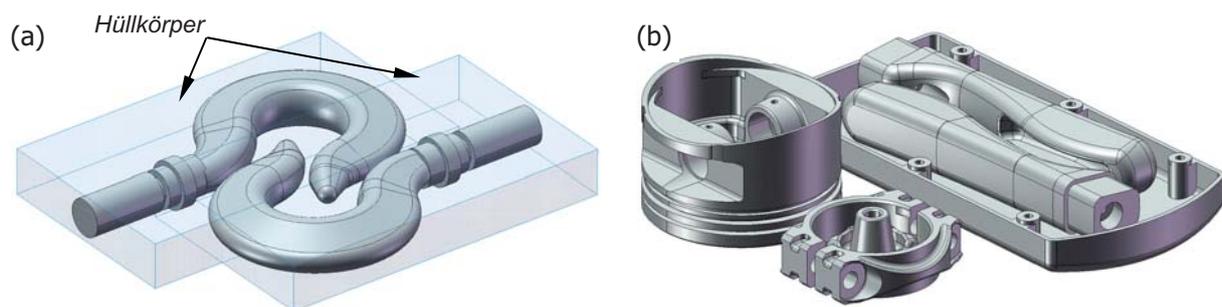


Abb. 3-5: Objektbasierte Bauteilplatzierung im Bauraum

3.3 Konzeptentwurf

Zur Optimierung der Bauteilorientierung wird im Rahmen dieser Arbeit eine Applikation entwickelt, die unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen ein beliebiges Objekt analysiert und anschließend regelbasiert die Einflusskriterien quantifiziert sowie die Orientierung bewertet. Einen Überblick über das zugrunde gelegte Konzept liefert Abb. 3-6. Als Eingangsdaten dienen in der Regel 3D-CAD-Daten, die in ein Facettenmodell konvertiert werden. Zur Verwendung im Optimierungssystem werden die geometrischen Daten durch Herstellen der

Topologie des Objekts und durch Überführung in eine objektorientierte Datenstruktur aufbereitet. Unter Berücksichtigung von Prozessparametern entwickelte mathematische Modelle bilden als Bestandteil der Wissensbasis die auf Erfahrungswerten basierenden Regeln ab.

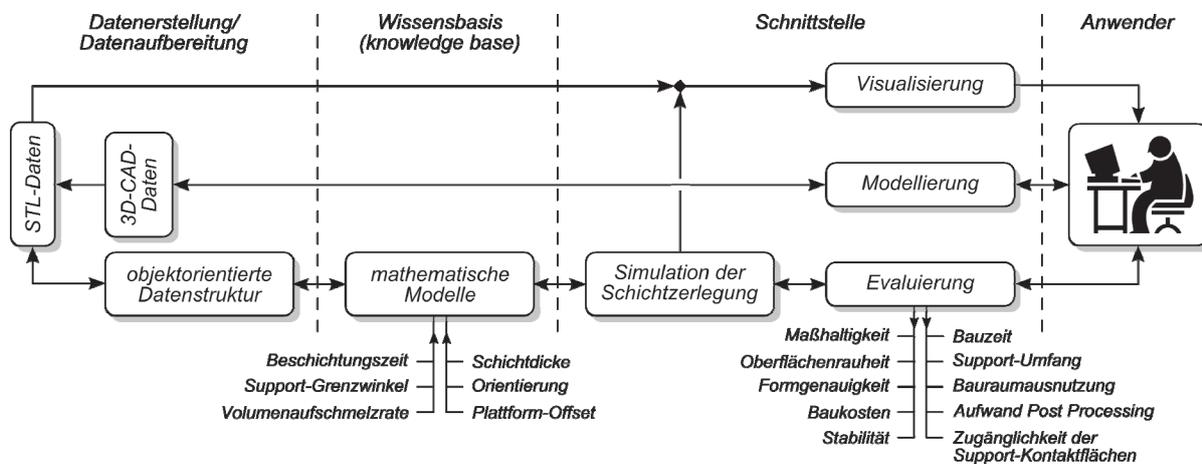


Abb. 3-6: Architektur des Optimierungssystems

Einen wesentlichen Schritt im Optimierungsprozess stellt die Simulation des Schichtzerlegungsprozesses durch Anwendung der mathematischen Modelle dar, da sich hierdurch anhand der berechneten Schichtkonturen zahlreiche Kennwerte ermitteln lassen. Die anschließende Evaluierung quantifiziert die Qualitätsmerkmale und bewertet die betrachtete Orientierung. In einem iterativen Prozess werden schließlich verschiedene Orientierungen des Objekts analysiert und bewertet, so dass mit Hilfe des Optimierungssystems eine sukzessive Approximation des Optimums erreicht werden kann. Visualisierungsmöglichkeiten gestatten zudem einen Anwendereingriff zur erfahrungsbasierten Korrektur des Prozesses.

Neben der Kenntnis der Existenz Einfluss ausübender Faktoren auf die Bauteil- und Prozessqualität ist das Greifbar-Machen, also die Zuordnung verarbeitbarer Kenngrößen, von entscheidender Bedeutung. Zahlreiche Anforderungskriterien lassen sich nur schwer durch messbare Größen und Zahlenwerte formulieren, so dass eine wesentliche Herausforderung in der Quantifizierung mit dem Ziel der Vergleichbarkeit verschiedener Orientierungen liegt. Gerade die numerische Beschreibung der Bauteilqualität, welche zunächst lediglich ein Ausdruck subjektiver Wahrnehmung zu sein scheint, bedarf eines besonderen Augenmerks. Das Ziel in dieser Arbeit ist daher zunächst die Quantifizierung der zu berücksichtigenden Einflüsse und damit die zahlenmäßige Bewertung einzelner Orientierungen. Die daraus resultierende Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Orientierungen gestattet schließlich die Anwendung von Methoden zur Optimierung. Die in dieser Arbeit entwickelten und eingesetzten Methoden zur Kodierung der hier genannten Anforderungskriterien werden in Kapitel 5 vorgestellt. Die verwendeten Algorithmen zur Optimierung sind Inhalt des Kapitels 6.

4 Stand der Wissenschaft

Angesichts der rapide wachsenden Zahl wissenschaftlicher Publikationen im Bereich der generativen Fertigungstechnik, die in ihrer Vielfalt den Stand der Forschung und der Technik dokumentieren, erhebt dieses Kapitel keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr sollen hier die interessantesten und die für eine wissenschaftliche Betrachtung relevantesten Ansätze im Kontext der vorgestellten Problemdefinitionen vorgestellt werden. Hierbei werden ausschließlich wissenschaftliche Ansätze mit Bezug auf die Rapid-Technologie beleuchtet. Da die einzusetzende Optimierungsmethode selbst nicht im Vordergrund steht, finden Ansätze zu Optimierungsstrategien keine Berücksichtigung. Eine Begründung zur Methodenauswahl für die vorliegende Arbeit findet sich in Abschnitt 6.1. Dieses Kapitel wird mit einer kritischen Bewertung der vorgestellten Lösungsansätze und einer Abgrenzung sowie Einordnung der vorliegenden Arbeit abgeschlossen.

4.1 Ansätze zur Optimierung des Datentransfers

4.1.1 Problemdefinition

Der De-facto-Standard STL als Datenübertragungsformat für Anwendungen der Rapid-Technologie erfüllt seit geraumer Zeit nicht mehr die Anforderungen an eine zukunftsorientierte Datenschnittstelle [StXi00]. Insbesondere die häufig mit der Konvertierung auftretenden Fehler und der damit verbundene Reparaturaufwand, die massive Datenredundanz sowie die formatbedingten Abbildungsungenauigkeiten erfordern eine Alternative. Ein Schwerpunkt der Betrachtung bezieht sich auf die fehlende Vollständigkeit übertragbarer Informationen, die zur Absicherung der Konstruktions- und Fertigungsziele notwendig sind.

4.1.2 Weiterentwicklungen des STL-Formats

Die seit Jahren bekannten Defizite des Quasi-Standards STL resultierten in den vergangenen Jahren in zahlreichen Weiterentwicklungen, die jedoch nur bedingt die Limitierungen des Datenformats adressieren. So wurde die STL-Struktur um topologische Informationen angereichert und die Redundanz aufgehoben. Beispiele hierfür sind das RPI-Format (*Rapid Prototyping Interface*), das durch die Erweiterbarkeit des Formats eine gewisse Flexibilität aufweist [RoWo91], oder auch das von CHUA et al. entwickelte LMI-Format (*Layer Manufacturing Interface*), welches durch die Anreicherung mit topologischen Informationen die Überprüfung der Modellkonsistenz und nachfolgende Prozesse (z. B. Schichtzerlegung) vereinfacht [CGT97]. Andere Ansätze fokussieren das beschreibende Datenmodell. So stellt das von Cu-

bital Ltd. entwickelte CFL-Format (*Cubital Facet List*) eine allgemeine polygon-basierte Repräsentation eines Objekts dar. Die Speicherung erfolgt redundanzfrei durch Beschreibung der Polygoneckpunkte über Verweise auf indizierte Elemente einer Vertex-Liste. Verbesserungen am STL-Format, wie die Erhöhung der Darstellungsgenauigkeit oder die Speicherung von Farbinformationen für farbige Prototypen, werden auch zukünftig in aller Regel zu einer Verfeinerung der Vernetzung und somit zum Anstieg der Dateigröße führen. Um dieser Problematik gerecht zu werden, entwickelten ZHANG et al. das CS-Format (*compressed STL*). Die üblichen 32-Bit-Integer (ermöglicht die Speicherung von 4 Milliarden Eckpunkten) werden bei diesem Ansatz durch 14-Bit- oder 20-Bit-Integer ersetzt, so dass die Speicherung überflüssiger Leerstellen entfällt. Dies führt zu erheblich geringeren Dateigrößen. Ähnliche Überlegungen zur Reduzierung des Speicherbedarfs führten im Rahmen der OpenRP-Initiative zum RP-Format (*openRP File Format*). Neben der enormen Komprimierung von bis zu 95 % und der Möglichkeit zur Verschlüsselung bietet aber auch dieses Format keine nennenswerten Vorteile gegenüber dem STL-Format. Weitere Formate, die zwar zu einer deutlichen Ersparnis des Speicherplatzbedarfs führen aber die gleichen Probleme wie das STL-Format aufweisen, sind z. B. das von BROCK ROONEY & ASSOCIATES entwickelte STH-Format (*Surface Triangles Hinted Format*) [BRA92] oder auch das von McMAINS vorgestellte SIF-Format (*Solid Interchange Format*) [MSS02].

4.1.3 Ansätze zur Erhöhung der Bauteilgenauigkeit

Neben der Redundanz und dem eingeschränkten Informationsspektrum verhindert insbesondere die unzureichende Approximationsgenauigkeit des De-facto-Standards STL das Vorschreiten der Rapid-Technologie. Daher wurden in den vergangenen Jahren Ansätze zur Erhöhung der Bauteilgenauigkeit entwickelt. So präsentieren WU und CHEUNG ein erweitertes STL-Format (*enhanced STL*), bei dem Dreiecksflächen durch Tetraeder zur Erhöhung der Approximationsgenauigkeit ersetzt werden (siehe Abb. 4-1) [WuCh06].

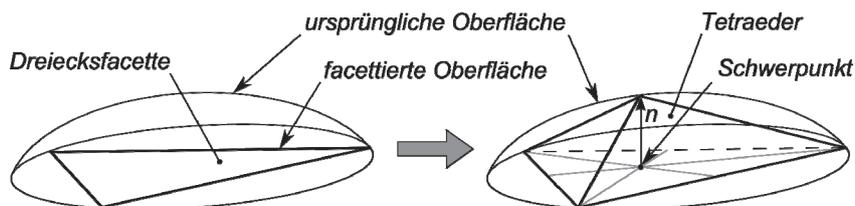


Abb. 4-1: Erhöhung der Approximationsgenauigkeit durch Tetraeder-Bildung

Hierzu werden zwei bis dato nicht verwendete Bytes im STL-Format mit zusätzlichen Informationen belegt, die für die Erzeugung der Tetraeder notwendig sind. Dies sind zum einen die Höhe des Tetraeders und zum anderen eine frei wählbare Information (z. B. Farbgebung). Mit diesem Verfahren wird im Ansatz den gestiegenen Anforderungen genüge getan, jedoch bleibt das Problem der redundanten Speicherung und somit des unnötig hohen Datenvolumens bestehen. Eine weitere Problematik ergibt sich beim Slicen des Modells (vgl. Abb. 4-2). Im Gegensatz zum STL-Format werden hier Tetraeder geschnitten, so dass sich ein genauere Polygonzug ergibt, jedoch mehr Rechenaufwand betrieben werden muss. Zudem können Zickzack-Verläufe auftreten, die es in einem zusätzlichen Optimierungsschritt zu eliminieren gilt, um den Konturzug zu glätten. Eine weitere aktuelle Entwicklung ist das von WANG et al. vorgestellte ETL-Format [WaLe07]. Neben einer einfachen Schichtzerlegung so-

wie der Möglichkeit, Farb- und Texturinformationen zu speichern, liegt der Fokus bei diesem Format auf der Darstellungsgenauigkeit. Das ETL-Format besteht aus zwei verknüpften Dateien, die separat die Modellgeometrie und Oberflächendetails wie Farbe und Textur beschreiben. Dies führt jedoch zu einem ungeeigneten Handling beim Datentransfer.

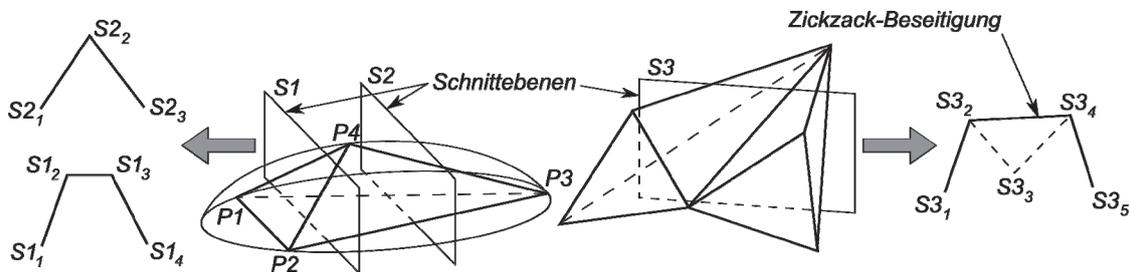


Abb. 4-2: Verschiedene Slicing-Situationen an Tetraedern

4.1.4 Ansätze zur Modellierung heterogener Bauteile

Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass zukünftig vermehrt Multimaterialbauteile (z. B. Integration mechatronischer Elemente [GSG05]) für den generativen Fertigungsprozess verwendet werden. Die gradierten Eigenschaften müssen entsprechend datentechnisch gekennzeichnet werden, damit diese Informationen im Rahmen der Schichtzerlegung ausgewertet werden können. Die frühesten Entwicklungen resultierten in einem mathematischen Modell, das während des Slice-Vorgangs ausgewertet wird [KuDu97]. Zur Vermeidung proprietärer Datenformate wurde eine in einem modifizierten STL-Format gespeicherte Baumstruktur zur Repräsentation verschiedener Materialbereiche eingeführt [ChTa00]. Weitergehende Entwicklungen adressieren die Definition gradiertter Bauteile im CAD-Umfeld anhand signifikanter Feature [Siu02] oder durch die Verwendung von Einheitszellen [Sun00]. Während SIU Attribute der im CAD-System gespeicherten Feature analysiert und transferiert, wertet SUN die topologischen Informationen des gesamten Modells aus, da jede Einheitszelle mit einem Datensatz bzgl. gradiertter Eigenschaften ausgestattet ist. Ein weiterer Ansatz zur Übertragung von Bauteilinformationen mit heterogenen Produkteigenschaften, insbesondere Multimaterialien, besteht in einer voxel- oder netzbasierten Modellrepräsentation [Pra00], [Jack00]. Zunehmend konzentrieren sich die Entwicklungen auf die Erweiterung offener Datenformate, wie z. B. XML (*Extensible Markup Language*) oder STEP. So präsentieren PATIL et al. ein auf STEP basiertes Informationsmodell zur Definition heterogener Bauteile durch die Entwicklung entsprechender Applikationsprotokolle [Pat02]. Ähnliche Lösungsansätze finden sich in [ZXY04]. LAU et al. konzentrieren sich dagegen mehr auf das offene Format XML [Lau02], welches aufgrund der unbegrenzten Erweiterbarkeit zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Betrachtung gerät. Insbesondere das von der ASTM (*American Society for Testing and Materials*) initiierte Konsortium „STL 2.0“ zur Entwicklung eines neuen anforderungsgerechten Schnittstellenformats für Rapid-Anwendungen setzt auf XML. Hieraus entstand auch das AMF-Format (*Additive Manufacturing File*) als Initiative zur Standardisierung eines XML-basierten Datenaustauschs für die Rapid-Technologie [HiLi09]. Trotz Erweiterbarkeit und zahlreicher Möglichkeiten zur Speicherung verschiedenster Informationen im XML-Format, stellt sich jedoch stets die Frage nach entsprechenden Konvertern, die die geometrischen und semantischen Informationen in die gewünschte Struktur umwandeln müssen.

4.1.5 STEP-basierter Datenaustausch

Derzeit existiert kein Anwendungsprotokoll für die schichtweise Fertigung, wobei jedoch diese Bestrebungen vor einigen Jahren initiiert wurden und noch bis heute andauern. Bereits jetzt erfüllt STEP eine Vielzahl von Anforderungen eines GF-gerechten Datenaustauschs durch die Bereitstellung entsprechender Bausteine [Kum98], [KFP02], [Pat02]. Die folgende Tabelle (Tab. 4-1) zeigt bereits in STEP enthaltene Ressourcen, die die wesentlichen Anforderungen der Rapid-Technologie erfüllen. So können bewährte Teile der STEP-Ressourcen, wie z. B. IGR42 für die Definition von Konturen und Füllmuster, IGR45 für Materialinformationen oder auch IGR49 für die Übertragung von Prozessinformationen, für einen GF-gerechten Datenaustausch verwendet werden. Ein Nachteil des STEP-Formats ist jedoch, dass Informationen zum Teil redundant abgespeichert werden und STEP unzählige für den GF-Prozess irrelevante Informationen beherbergt. Dies erfordert spezielle Interpreter für den Austausch von Daten zwischen CAD- und GF-Systemen.

Tab. 4-1: GF-gerechte Ressourcen in STEP

Anforderungsfeld	Ressourcen in ISO 10303
Geometrie & Topologie	Part 42 (IGR), Geometric and topological representation
	Part 511 (AIC), Topologically bounded surface
	Part 512 (AIC), Faceted boundary representation
	Part 514 (AIC), Advanced boundary representation
Materialinformationen	Part 45 (IGR), Materials
Toleranzen	Part 47 (IGR), Shape variation tolerances
	Part 519 (AIC), Geometric tolerances
Prozessinformationen	Part 49 (IGR), Process structures and properties
Mathematische Konstrukte	Part 50 (IGR), Mathematical constructs
Datentransfer	Part 26 (IM), Binary representation of EXPRESS-driven data
AIC = Application Interpreted Constructs, IGR = Integrated Generic Resources, IM = Implementation Methods	

4.1.6 Fazit

In den letzten 15 Jahren wurden zahlreiche Weiterentwicklungen am STL-Format durchgeführt sowie Konzepte eines alternativen Schnittstellenformats entwickelt. Diese führten zu mehr oder weniger beträchtlichen Verbesserungen gegenüber dem STL-Format, konnten sich aber bis dato nicht etablieren. Des Weiteren haben die rasanten Entwicklungen der Rapid-Technologie dazu geführt, dass mit zusätzlichen Modellinformationen eine Optimierung der einzelnen Prozesse möglich wäre. Gerade eine Automatisierung der Prozessplanung benötigt jedoch mehr geometrische und topologische Informationen [Boh97], [PMKD98]. Das rein geometrische STL-Format kann dies nicht bieten, wohingegen einige neue Ansätze die Übertragung von Produkt- und Prozessinformationen ermöglichen (vgl. Tab. 4-2). Der aus Sicht des Autors vielleicht vielversprechendste Ansatz zur zeitnahen Substitution des De-facto-Standards ist wohl die Entwicklung eines STEP-Anwendungsprotokolls für Anwendungen der Rapid-Technologie, da dieses Format die günstigsten Voraussetzungen für einen verlustfreien Datenaustausch mit umfangreichen Produkt- und Prozessinformationen bietet [DaKö08]. Dies führt dazu, dass ein als STEP gespeichertes Modell bereits im CAD-System optimal orientiert und in Schichten zerlegt werden kann [ZXY03]. Sofern dies nicht erwünscht ist, kann

das Modell in einem neutralen Format zu GF-Systemen übertragen werden. Außerdem könnte STEP Schichtdaten speichern, die zwischen CAD- und GF-System oder von GF- zu GF-System transferiert werden können. Die weite Verbreitung und die Tatsache, dass STEP in vielen Bereichen seit Jahren intensiv und erfolgreich zum Einsatz gekommen ist, begünstigt den Vorstoß, STEP um Aspekte der Rapid-Technologie zu erweitern und somit als anerkannter Standard das bislang favorisierte STL-Format abzulösen. XML als offenes Format zur Übermittlung von Daten für Rapid-Anwendungen bietet gegenüber STEP noch mehr Potenziale. Jedoch fehlen hier bis dato Möglichkeiten und Erfahrungen der CAX-nahen Integration zur Übermittlung der geforderten Informationen. Daher erscheint eine Substitution des aktuellen Formats durch eine XML-Struktur in absehbarer Zeit als fraglich. Neben den hier genannten Lösungsansätzen beschäftigen sich zudem aktuelle Entwicklungen mit dem Einsatz weiterer alternativer Formate, wie JT (*Jupiter Tessellation*) oder PDF (*Portable Document Format*) [Woh08].

Tab. 4-2: Erfüllung der Anforderungen verschiedener Schnittstellenformate

		Schnittstellenformate													
		CFL	CS	eSTL	ETL	LMI	PLY	RP	RPI	SIF	STEP	STH	STL	VRML	XML
Anforderungen	Darstellung allg. Flächen					■					■				■
	allg. Facettendarstellung	■									■				■
	triangulierte Darstellung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	B-Rep					■			■		■				■
	CSG								■		■				■
	Farbinformationen	■		■	■		■				■		(■)	■	■
	Materialinformationen	■					■				■		(■)	■	■
	Prozessinformationen	■					■				■		(■)	■	■
	Redundanzfreiheit	■				■	■	■	■	■		■		■	■
	Erweiterbarkeit	■					■		■		■				■
	geringer Speicherbedarf	■	■			■	■	■	■	■		■		■	
	hoher Verbreitungsgrad			■			■				■		■	■	■
	verbessertes Slicing		■		■	■		■		■	■	■	■		
	Toleranzen										■				■

4.2 Ansätze zur Optimierung der Bauteilorientierung

4.2.1 Problemdefinition

Die Bauteilorientierung stellt einen rein auf Erfahrungswissen basierten Vorgang dar, für den trotz steigender Bauteilkomplexität und wachsender Zahl an Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren derzeit keine algorithmenbasierte Unterstützung existiert. In den letzten 15 Jahren wurden zahlreiche Ansätze zur Optimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie entwickelt. Die dabei verwendeten Methoden und Optimierungsziele sind jedoch verschiedenster Natur mit unterschiedlichen Schwerpunkten, so dass hier lediglich eine Unterscheidung zwischen geometrie- und parameterbasierten Ansätzen erfolgt. Ein kurzer Überblick über die verschiedensten Lösungsansätze skizziert den Stand der Wissenschaft auf dem Gebiet der Orientierungsoptimierung.

4.2.2 Geometriebasierte Ansätze

Einer der ersten und populärsten Optimierungsansätze auf diesem Gebiet ist der von ALLEN & DUTTA [ALDu94]. Dieser behandelt die Ermittlung einer optimierten Bauteilorientierung unter Berücksichtigung minimaler Kontaktfläche zwischen Bauteil und Stützkonstruktionen. Großflächige Facetten der konvexen Hülle eines Bauteils werden als mögliche Basisflächen in Betracht gezogen. Unter diesen möglichen Orientierungen wird die Baurichtung gewählt, die den geringsten Kontakt zwischen Bauteilfläche und Stützgeometrie zulässt. Weiterhin wird die Lage des Schwerpunkts berücksichtigt, um somit für eine gewählte Bauteilorientierung einen stabilen Zustand zu gewährleisten. Dabei wird während der Berechnung des Schichtenmodells lediglich die z-Koordinate des Massenschwerpunkts betrachtet, was nicht zwangsläufig zu einer gesicherten Aussage über die Stabilität eines Bauteils führt. Die Bauhöhe sowie das Volumen der Stützkonstruktionen und die daraus resultierenden Baukosten finden hier keine Berücksichtigung. Darüber hinaus werden der Treppenstufeneffekt und die damit einhergehende Bauteilgenauigkeit außer Acht gelassen. Ähnliche Vereinfachungen, insbesondere hinsichtlich der Stützkonstruktionen, liefern THOMPSON & CRAWFORD [ThCr95]. Die Ermittlung der geringsten Bauzeit erfolgt auf Basis einer quaderförmigen Umhüllenden mit der geringsten z-Koordinate (Baurichtung), was keinerlei Aussage über die tatsächlichen Abmessungen des zu fertigenden Bauteils zulässt. Der Treppenstufeneffekt, und somit die wichtigste Kenngröße der Oberflächenqualität, findet in diesem Ansatz nur ungenügend Berücksichtigung. Die meisten hierauf aufbauend weiterentwickelten Ansätze konzentrieren sich vorwiegend auf den Treppenstufeneffekt als Maß für die Oberflächengenauigkeit. Dies kann durch die Ermittlung der Treppenstufeneffekt-Fläche oder des Differenzvolumens zwischen Facetten- und Schichtmodell erfolgen. KIM et al. verwenden die Methode der „simulierten Abkühlung“ (engl. *simulated annealing*) als Optimierungsmodell bei der Stereolithographie unter Verwendung des Treppenstufen-Volumens [KLP94]. Ähnliche Ansätze mit Schwerpunkt auf der Oberflächengenauigkeit verfolgen HUR & LEE [HuLe98], LAN et al. [LCCG97], LIN et al. [LSY01] sowie XU et al. [XLW99]. Im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens der Universität Stuttgart (DFG-Zeichen: LE 409/32) wurde ein Konstruktionssystem für Rapid-Prototyping-gerechte Bauteile entwickelt. Während eine Maschinen- und Materialdatenbank zur Unterstützung der Verfahrensauswahl zur Verfügung steht, erfolgt die Orientierungsoptimierung lediglich auf Basis des quantifizierten Treppenstufeneffekts. Umfangreichere mathematische Modelle finden sich in den Ansätzen von MAHJI et al. [MaJa98] und SCHWERDT [Schw01]. Hier werden Ansätze zur Quantifizierung von Qualitätsmerkmalen auf Basis geometrischer Algorithmen vorgestellt, die sequenziell unabhängig voneinander zur Anwendung kommen oder mit Hilfe benutzerdefinierter Gewichtung der Einzelkriterien ihre Summe optimieren. Neben einigen Vereinfachungen zur Kenngrößenermittlung beschränkt sich die Anwendbarkeit der Algorithmen größtenteils auf konvexe Polyeder. PANDEY et al. optimieren die Bauteilorientierung für SLA-Anwendungen ausschließlich auf Basis quantifizierter Rauheit durch den Treppenstufeneffekt [PaSi05]. Hierzu verwenden sie ein von MCCLURKIN & ROSEN entwickeltes mathematisches Modell zur Beschreibung der Oberflächenrauheit, welches auf Erfahrungswerten und durchgeführten Experimenten basiert [McR98]. PANDEY et al. quantifizieren die Rauheit Ra_i (in μm) einer Facette i bei 0,02 mm Schichtstärke demnach wie folgt:

$$Ra_i = (2 \cos \theta \sin \theta \cdot 937 + 3,5\theta + 48) \cdot 0,0254, \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (4.1)$$

$$Ra_i = (2 \cos(\pi - \theta) \sin(\pi - \theta) \cdot 937 + 3,5\theta + 48) \cdot 0,0254, \quad \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi \quad (4.2)$$

Dabei bezeichnet θ den Winkel zwischen der Facettennormale und der Baurichtung (z-Achse). Die durchschnittliche Rauheit Ra (in μm) eines Bauteils ergibt sich somit zu

$$Ra = \frac{\sum Ra_i A_i}{\sum A_i}, \quad (4.3)$$

wobei A_i den Flächeninhalt einer Facette i bezeichnet. Unterschiede in der Rauheit bei aufwärts- ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) und abwärtsgerichteten Flächen ($\pi/2 < \theta \leq \pi$) resultieren aus den Auswertungen durchgeführter Versuchsreihen. Eine Ursache hierfür ist z. B. der bei der Stereolithographie auftretende Print-Through-Effekt. Die Verwendung eines auf Erfahrungswerten basierenden mathematischen Modells erscheint zunächst sinnvoll, da hiermit die zu erwartende Oberflächenqualität anhand des Facettenmodells vorhergesagt werden kann. Nachteilig ist jedoch, dass für jedes Verfahren zahlreiche Modelle aufgestellt werden müssten, da theoretisch jede erdenkliche Kombination der Prozessparameter (insbesondere die Schichtdicke) in verschiedenen Kennwerten resultiert. Ein weiterer Ansatz zur Quantifizierung der Einflussfaktoren stellt die Klassifizierung einzelner Facetten dar. So optimieren CHENG et al. die Bauteilorientierung durch Erhöhung der Bauteilgenauigkeit unter Verwendung klassifizierter Flächen, die je nach Grad der Beeinflussung gewichtet werden [ChFu95]. Bei Mehrfachlösungen greift das Nebenkriterium der minimalen Bauzeit. Auch hier ist die Kenntnis entsprechender Kennwerte und Gewichtungsfaktoren Voraussetzung. Dies erfordert wiederum eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle. Weitere Ansätze konzentrieren sich auf die Auswirkungen von Stützkonstruktionen auf die Bauteil- und Prozessqualität. ALEXANDER et al. präsentieren ein mathematisches Modell zur Quantifizierung des Einflusses der Supports durch Ermittlung des Support-Volumens und der Kontaktfläche am Bauteil sowie zur Bewertung des Treppenstufeneffekts [AAD98]. Zusätzlich beinhaltet der Ansatz Kostenmodelle für verschiedene generative Verfahren. Mechanische Eigenschaften finden keine Berücksichtigung.

Zur Eingrenzung der Kombinationsvielfalt möglicher Orientierungen basieren einige Entwicklungen auf der Interaktion des Anwenders in einer CAD-Umgebung zur Definition bevorzugter Orientierungsachsen, wie z. B. bei BABLANI & BAGCHI [BaBa95], PHAM et al. [PDG99] oder MASOOD et al. [MaRa02]. Bei rotationssymmetrischen Geometrien und einfachen Körpern erscheint die Wahl benutzerdefinierter Achsen schlüssig. Steigt die Komplexität der Bauteile an, so bleibt fraglich, ob sich zu favorisierende Richtungen vom Anwender definieren lassen. Das von FRANK und FADEL vorgestellte Optimierungsverfahren für den SLA-Prozess beruht auf einem regelbasierten Expertensystem und erfordert ebenfalls Benutzereingriffe zur Selektion zwei signifikanter Feature und ihrer Hauptachsen, mit dessen Hilfe die bevorzugten Orientierungen ermittelt werden [FrFa95]. Auch hier ist bei komplexen Geometrien die Definition von Hauptachsen und die Einschränkung auf zwei Hauptfeature kaum zu realisieren. RATTANAWONG et al. optimieren die Bauteilorientierung ebenfalls auf der Basis der CAD-Geometrie, genauer durch Berechnung des Volumenfehlers primitiver Körper [Ratt01]. Dies setzt idealerweise voraus, dass sich selbst komplexe Körper durch primitive Geometrien beschreiben lassen.

ZHAO et al. minimieren in ihrem Ansatz den durch den schichtweisen Aufbau bedingten Volumenfehler, die Kontaktfläche zu Supports und die Anzahl der Schichten [ZLW05]. Diese Kenngrößen werden unabhängig voneinander zur Bewertung einer Orientierung berechnet und mit Hilfe eines genetischen Algorithmus optimiert. Die Berechnung des Volumenfehlers erfolgt stark vereinfacht. Weitere Einflüsse bzgl. der Oberflächenqualität oder auch der Materialaufwand für Stützkonstruktionen bleiben in diesem Ansatz unberücksichtigt. Einen ähnlichen Ansatz auf Basis eines genetischen Algorithmus, jedoch mit dem Ziel der Minimierung der durchschnittlichen gewichteten Oberflächenrauheit, liefern BYUN & LEE [ByLe05].

Neuere Ansätze adressieren die Optimierungsmethode zur Beschleunigung der notwendigen Berechnung. Anstelle der üblichen Brute-Force-Methode⁵ kommen verschiedene Optimierungsmodelle zum Einsatz. GHORPADE et al. verwenden am Beispiel des FDM-Verfahrens die Methode der Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO) zur Ermittlung der besten Bauteilorientierung unter Berücksichtigung des Volumenfehlers, der Baukosten und der Bauraumausnutzung [GKT07]. Zum einen werden in diesem Ansatz einige wichtige Einflussfaktoren auf die Orientierung des Bauteils vernachlässigt und zum anderen führt die Verwendung des PSO-Algorithmus nicht zwangsläufig zu einem globalen Optimum aufgrund der Gefahr fehlender Konvergenz.

Neben den genannten Lösungsvorschlägen existieren weitere Denkansätze, die zur Erhöhung der Oberflächengenauigkeit als Hauptkriterium des Optimierungsvorgangs eine adaptive Schichtzerlegung integrieren. So optimieren SREERAM & DUTTA die Orientierung eines Bauteils für den Stereolithographie-Prozess durch Ermittlung einer Position mit der geringsten Schichtanzahl sowie, als Nebenkriterium, mit stabilem Gleichgewichtszustand und dem geringsten Verhältnis zwischen der Treppenstufeneffekt-Fläche und der gesamten Oberfläche des Bauteils [SrDu94]. Ein auf einer adaptiven Schichtzerlegung basierendes Optimierungsmodell findet sich ebenfalls in [Mar97] und [Xu97].

4.2.3 Parameterbasierte Ansätze

Die geometrische Beschreibung des zu fertigenden Objekts ist nicht ausschließlich für die Produkt- und Prozessqualität maßgebend. Vielmehr beeinflussen gerade die gewählten Prozessparameter die Qualitätsmerkmale des Bauteils in besonderem Maße. Daher erscheint die Einbindung der relevanten Kenngrößen durchaus sinnvoll. CHOI & SAMAVEDAM entwickelten ein Virtual-Reality-System zur Simulation und Visualisierung der orientierungsabhängigen Qualitätsmerkmale einer SLS-Anlage [ChSa02]. Die berücksichtigten Prozessparameter sind hier die Schichtdicke, der Hatch-Abstand, die Pulverbett-Temperatur, die Laserleistung sowie der Sinterfaktor. Ein entsprechendes mathematisches Modell zielt schließlich auf die Auswertung der Prozessparameter zur Vorhersage der Bauteilgenauigkeit sowie der Bauzeit ab. Einen ähnlichen auf Prozesskenngößen basierten Lösungsansatz liefern WEST et al. [WSR01].

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der Bauteilorientierung besteht z.B. in der Abschätzung des erforderlichen Aufwands für die Nachbearbeitung. Im Ansatz von KIM & LEE wird der zeitliche und finanzielle Aufwand für das durch den Treppenstufeneffekt und die

⁵ Ein naiver und zugleich einfacher Ansatz zu einer algorithmischen Lösung eines Problems besteht in der sequenziellen Abarbeitung des gesamten Suchraums. Diese Methode bezeichnet man als Brute-Force-Suche.

Entfernung von Supports bedingte Post Processing zur Verbesserung der Oberflächenqualität minimiert [KiLe05]. Als Entscheidungsgrundlage dienen Prozessparameter sowie Vergleiche zwischen interpolierten geometrie- und parameterbasierten Rauheitskenngrößen und Rauheitsmessungen im Rahmen durchgeführter Versuchsreihen mit Beispielbauteilen. Aspekte der Wirtschaftlichkeit des eigentlichen Bauprozesses sowie der Bauteilgenauigkeit bleiben bei diesem Ansatz gänzlich unberücksichtigt. Ähnliche Überlegungen verfolgt der Ansatz von THRIMURTHULLU et al. für FDM-Anwendungen [TPR04]. Zentraler Gegenstand ist eine parameterbasierte Abschätzung der durchschnittlichen Rauheit nebst Berücksichtigung der Bauzeit.

4.2.4 Fazit

Bei genauerer Betrachtung setzen sich die in den Ansätzen entwickelten Überlegungen lediglich mit Teilproblemen der Bauteilorientierung in Form einer unikriteriellen Optimierung auseinander und wurden in der Regel verfahrensspezifisch entwickelt. Ansonsten wurden zahlreiche Ansätze entwickelt, die auf stark vereinfachten Geometrien, wie Primitive (Zylinder, Quader, Kegel u. Ä.) oder rein konvexe Körper, basieren und nicht auf eine beliebige Geometrie übertragbar sind. Daher eignen sich diese Ansätze nicht für den praktischen Einsatz, sondern sind eher von rein akademischer Natur. Ein weiterer Schwachpunkt zahlreicher Ansätze ist die ungenaue Quantifizierung des Treppenstufeneffekts. Während für einige Verfahren die Verwendung approximierter Kenngrößen durchaus legitim erscheint, erfordern gerade die zukünftig zu erwartenden technischen Verbesserungen und die damit steigenden Anforderungen an die Bauteilqualität ein genaueres Maß für die Oberflächenqualität. Eine exakte Erfassung der Geometrieabweichung zwischen Ursprungsmodell und gefertigtem Bauteil wurde bisher in keinem Ansatz realisiert. Gelegentlich finden sich Ansätze, die zur Einschränkung der theoretisch möglichen Orientierungen eine ausreichend große Basisfläche voraussetzen. Angesichts der steigenden Bauteilkomplexität (z. B. medizinische Implantate, Designbauteile, etc.) kann diese Prämisse nicht immer erfüllt werden.

Die Vielzahl der entwickelten Ansätze unterstreicht einerseits den Bedarf einer regelbasierten Bauteilorientierung zur Verbesserung der Bauteil- und Prozessqualität und die daraus ableitbare Relevanz der Optimierungsaufgabe. Andererseits verdeutlichen die verschiedenen Herangehensweisen die Komplexität der zu betrachtenden Wechselwirkungen und das bis heute fehlende Vorliegen eines zufriedenstellenden Ansatzes. Zum derzeitigen Stand fehlt demzufolge eine auf beliebige Körper anwendbare Lösung zur ganzheitlichen Betrachtung der in Abschnitt 3.2 aufgezeigten Einflussfaktoren.

4.3 Ansätze zur Optimierung der Bauraumausnutzung

Die optimale Nutzung des Bauraums einer GF-Anlage entspricht im Allgemeinen einem geometrischen Packproblem (engl. *geometric packing*). Als geometrische Packprobleme werden solche Aufgabenstellungen bezeichnet, bei denen Objekte in einem oder mehreren vorgegebenen Räumen (2D oder 3D) unter optimaler Flächen- bzw. Volumenauslastung und unter Beachtung vordefinierter Randbedingungen angeordnet werden müssen. Diese Art kombinatorischer Optimierungsprobleme findet vorwiegend Anwendung in der Produktions- und Distributionslogistik aber auch in der Fertigung (z. B. Blechzuschnitte, Assemblierung von Bau-

gruppen, usw.). Eine gute Einführung in die Problematik der Packungsoptimierungen bietet [BiRa95], [DyFi92], [Sche08]. Zur Spezifizierung der vorliegenden Problemstellung wird hier das von DYCKHOFF entwickelte Verfahren zur Klassifizierung von Packproblemen [Dyc90] unter Verwendung einer vierstelligen Symbolkombination angewendet:

1. Dimensionalität (1: eindimensional, 2: zweidimensional, 3: dreidimensional, n : n -dimensional mit $n > 3$)
2. Verteilungstyp (B: eine Auswahl an Objekten wird auf alle Räume verteilt (Beladeproblem), V: alle Objekte werden auf eine Auswahl an Räumen verteilt (Verladeproblem))
3. Raumsortiment (O: ein einzelner Raum, I: identische Räume, D: verschiedene Räume)
4. Objektsortiment (F: wenige Objekte unterschiedlicher Gestalt, M: viele Objekte unterschiedlicher Gestalt, R: viele Objekte leicht unterschiedlicher Gestalt, C: Objekte kongruenter Gestalt)

Mit Hilfe dieses Klassifizierungsschlüssels lassen sich Pack- und Zuschnittprobleme eindeutig zuordnen. Eine Übersicht über gängige Problemstellungen liefert Tab. 4-3. Durch Anwendung des erläuterten Verfahrens lässt sich die Optimierung der Bauraumausnutzung einer GF-Anlage dem Typ 3/B/O/F bzw. 3/B/O/M zuordnen.

Tab. 4-3: Klassifizierung von Packproblemen

Problemtyp	Kennzeichnung
(klassisches) Rucksackproblem	1/B/O/...
Paletten-Beladungsproblem	2/B/O/C
mehrdimensionales Rucksackproblem	.../B/O/...
Duales Bin-Packing-Problem	1/B/O/M
Vehikel-Beladungsproblem	1/V/I/F(M)
Container-Beladungsproblem	3/V/I/... oder 3/B/O/...
(klassisches) Bin-Packing-Problem	1/V/I/M
(klassisches) Cutting-Stock-Problem	1/V/I/R
zweidimensionales Bin-Packing-Problem	2/V/D/M
gewöhnliches zweidimensionales Cutting-Stock-Problem	2/V/I/R
allgemeines Cutting-Stock-, oder Trim-Loss-Problem	1(2)(3)/.../.../...
Multiprozessor-Ablaufplanungsproblem	1/V/I/M
Entscheidungsproblem	1/B/O/R
Multi-Period-Capital-Budgeting-Problem	n /B/O/...

4.3.1 Problemdefinition

Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit eines Bauprozesses in einer GF-Anlage, gilt es den Bauraum optimal zu befüllen. Dabei sollte auf der einen Seite die Teile-Packung (engl. *package*) möglichst flach ausfallen, um die Bauzeit und die damit verbundenen Baukosten so niedrig wie möglich zu halten. Auf der anderen Seite sollte die mit der Orientierung verknüpfte Bauteilqualität infolge des mehr oder weniger ausgeprägten Treppenstufeneffekts bei der Teileanordnung berücksichtigt werden. Des Weiteren müssen eventuell vorhandene thermische Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen in die Bauraumplanung einfließen. Unter Beachtung dieser Randbedingungen muss die Entpackbarkeit der Bauteile stets gesichert sein. Die-

se und weitere Aspekte, wie z. B. die Stabilität der Bauteile zu jedem Zeitpunkt des Bauprozesses, müssen bei der Bauraumaufteilung Berücksichtigung finden.

4.3.2 Hüllkörperbasierte Ansätze

Zur Minimierung des Rechenaufwands werden häufig Umhüllende (siehe auch Abschnitt 5.1.3) der anzuordnenden Objekte anstelle der Originalgeometrien verwendet. Handelt es sich hierbei um quaderförmige Umhüllende, so bezeichnet man dieses dreidimensionale Packproblem auch als Container-Beladungsproblem (engl. *container packing problem*). Die folgende Abbildung (Abb. 4-3) zeigt beispielhaft verschiedene Packungsvarianten eines klassischen Beladungsproblems.

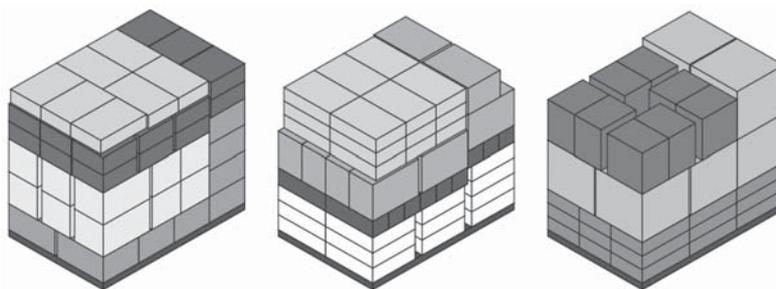


Abb. 4-3: Beispiel eines Container-Beladungsproblems

Die auf einfache Geometrien reduzierte Art der Objektrepräsentation führt zu folgender Fallunterscheidung bei der Definition des Problemtyps:

- **Homogenes Problem** – Die Quaderhüllen besitzen identische Abmessungen.
- **Schwach heterogenes Problem** – Die Vielzahl unterschiedlicher Quaderhüllen ist gering (je nach Anwendung 2-8 Hüllen unterschiedlicher Abmessungen).
- **Stark heterogenes Problem** – Aufgrund einer starken Diversität der Bauteilgrößen ist die Vielzahl unterschiedlicher Quaderhüllen sehr hoch. Dies kann bis zur unikalen Verwendung einer Box-Größe führen. Dieser Problemtyp erfordert häufig deutlich komplexere Lösungsansätze und führt somit in der Regel zu hohen Rechenzeiten.

Die Aufteilung des Bauraums einer GF-Anlage entspricht fast immer einem heterogenen Problem. Je nach gewünschter Auslastung des Bauraums kann die Heterogenität jedoch schwach oder stark ausgeprägt sein. Betrachtet man die in den letzten Jahren entwickelten Ansätze, so lassen sich diese prinzipiell in drei verschiedene Arten der Beladungsmethode einteilen. Beim sogenannten *Layer-Building-Ansatz* werden die Objekte in horizontalen Schichten angeordnet. Dagegen werden die Hüllkörper beim *Wall-Building-Ansatz* in vertikalen Schichten angeordnet. Letztere Variante wird häufig zur Lösung komplexer Beladungsprobleme mit unterschiedlichen Randbedingungen angewendet. Ein alternativer Ansatz sieht das *Tower-Building*, also die blockweise Anordnung von Objekten, vor. Für das vorliegende Packproblem empfiehlt sich jedoch das Layer-Building, da, anders als bei gängigen Beladungsproblemen, der zur Verfügung stehende Raum nicht immer vollständig gefüllt wird. Darüber hinaus entfallen die bei klassischen Packproblemen üblichen Restriktionen wie Stabilität des Beladungsraums, maximale Anzahl gestapelter Objekte oder auch maximales Bela-

dungsgewicht. Im folgenden Abschnitt werden zunächst ausgewählte hüllkörperbasierte Ansätze zur Lösung des vorliegenden Beladungsproblems aufgezeigt.

ELEY liefert einen allgemeinen Ansatz zur Lösung heterogener Container-Beladungsprobleme vom Typ 3/V/I/... bzw. 3/B/O/... [Ele02]. Zunächst erfolgt eine Sortierung der Objekte nach dem Volumen, da größere Objekte vorrangig platziert werden. Nach Platzierung des ersten Objekts werden zur Verfügung stehende mögliche Leerräume (vgl. Abb. 4-4) mit Hilfe des Halbraumtests (siehe auch Abschnitt 5.1.2.2) ermittelt und in einer Liste gespeichert. Jedes weitere Objekt wird in jeder erlaubten Orientierung in jedem möglichen Leerraum positioniert und hinsichtlich vordefinierter Gütekriterien ausgewertet. Nach jeder Platzierung erfolgt eine Aktualisierung der Leerraum-Liste.

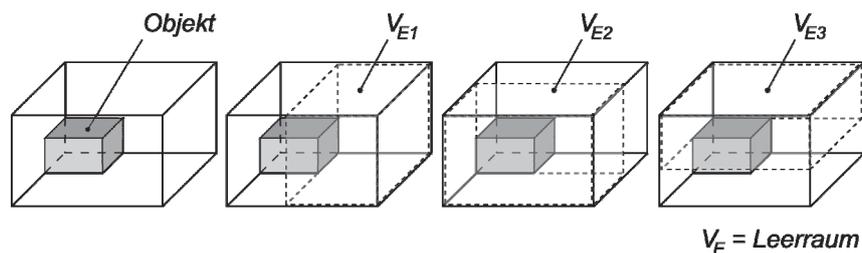


Abb. 4-4: Ermittelte Leerräume im Packprozess

Anders als viele andere Arbeiten auf diesem Gebiet basiert der von LIM et al. [LRW03] entwickelte Ansatz nicht auf dem reinen Layer- oder Wall-Building-Konzept, sondern sieht eine Befüllung des Beladungsraums von seinen Begrenzungsflächen aus vor (vgl. Abb. 4-5). Dabei besitzt jede begrenzende Fläche eine eigene Liste mit Leerräumen. Die Objekte werden in jeder zulässigen Orientierung positioniert und mit einem Gütefaktor versehen. Die Orientierung mit dem besten Wert wird für die Platzierung eines Objekts gewählt. Anschließend werden die Leerraumlisten aktualisiert. Während dieser Ansatz für Anwendungen der Logistik erfolgreich eingesetzt werden konnte, lässt sich das Konzept für die Rapid-Technologie in dieser Form nicht verwenden, da die Bauteile möglichst im Zentrum des Bauraums platziert werden sollten. Dennoch könnte dieser Ansatz dementsprechend modifiziert werden, so dass vom Mittelpunkt des Bauraums ausgehend die Bauteile in Richtung der Bauraumbegrenzungen angeordnet werden.

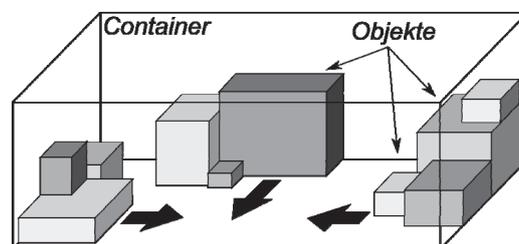


Abb. 4-5: Multi-Faced-Buildup von LIM et al.

Weitere zahlreiche Ansätze adressieren das Container-Beladungsproblem unter Verwendung des sogenannten *Bottom-Left-Ansatzes*⁶ [Lew03], [WFK94], [Yan08].

⁶ Unter dem Bottom-Left-Ansatz versteht man die Anordnung von zwei/dreidimensionalen Objekten, deren linke sowie untere Kante/Fläche stets den Rand des Containers oder ein anderes angeordnetes Objekt berührt.

4.3.3 Objektbasierte Ansätze

Beim Ansatz von DICKINSON & KNOFF werden die zu fertigenden Bauteile sequenziell anhand ihrer tatsächlichen Form, jedoch unter rein geometrischen Gesichtspunkten im Bauraum angeordnet [DiKn98]. Ein wesentliches Ziel dieses Ansatzes, die Effizienzsteigerung des Algorithmus, wird hierdurch sicherlich erreicht. Jedoch finden die verfahrensspezifischen Wechselwirkungen und orientierungsabhängigen Einflüsse auf die Bauteilqualität keine Berücksichtigung. Durch Vereinfachung der Bauteilgeometrie konnte der Berechnungsaufwand weiter reduziert werden, jedoch wird die Bauraumplanung immer noch als allgemeines Packproblem behandelt [DiKn02]. ZHANG et al. konzentrieren sich ebenfalls auf die Performance des Algorithmus und verwenden das *Simulated Annealing* als Optimierungsmodell [Zha02]. Das Modell-Layout verwendet die Originalgeometrie der eingelesenen STL-Daten, jedoch sind die zulässigen Geometrien auf einige Grundformen beschränkt. GOGATE & PANDE integrieren dagegen einen GA-basierten Optimierungsalgorithmus in ein CAD-System, der in einem ersten Schritt potenzielle Orientierungen ermittelt und anschließend auf dieser Basis die Layoutplanung erstellt [GoPa08].

4.3.4 Weitere Ansätze

HUR et al. [Hur01] verwenden anstelle quaderförmiger Umhüllende eine Voxel-Struktur zur besseren Approximation der zu packenden Bauteile. Mit Hilfe des Bottom-Left-Ansatzes und eines genetischen Algorithmus werden die Bauteile im Bauraum optimal positioniert. Andere Entwicklungen beschränken sich auf SLA-Anwendungen, da es sich hier um Verfahren mit Stützkonstruktionen handelt, und reduzieren somit das Beladungsproblem auf ein reines 2D-Problem [Ngo94], [CDMS06]. Streng genommen ist dies nicht zulässig, da nicht davon ausgegangen werden darf, dass der durch die Projektion des Bauteils auf die Bauplattform definierte Raum vollständig durch das Bauteil und angreifende Stützkonstruktionen ausgefüllt wird. Das vertikale Ineinandergreifen von Bauteilen wird hierdurch prinzipiell nicht ermöglicht.

4.3.5 Fazit

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Ansätze für die Lösung allgemeiner Packprobleme entwickelt. Da für das Packing bei Anwendungen der Rapid-Technologie besondere Randbedingungen zu beachten sind, stellen diese Ansätze interessante Überlegungen dar, können jedoch nicht in dieser Form für die Bauraumplanung generativer Verfahren angewendet werden. Zur Reduzierung der kombinatorischen Vielfalt basieren zudem zahlreiche Ansätze auf einer Hüllgeometrie der Bauteile oder schränken die möglichen Orientierungen durch benutzerdefinierte Angaben weiter ein. Ein objektbasierter Ansatz unter Berücksichtigung orientierungsabhängiger Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität fehlt zu diesem Zeitpunkt völlig.

4.4 Ansätze zur Optimierung der Schichtzerlegung

4.4.1 Problemdefinition

Charakteristikum jeder Anwendung der Rapid-Technologie ist der schichtweise Aufbau. Der hierdurch verursachte Treppenstufeneffekt beeinflusst maßgeblich die Qualität des gefertigten Produkts. Zur Vermeidung von Formabweichungen kann die Schichtdicke herabgesetzt werden, um so den Treppenstufeneffekt zu minimieren [ChKw02]. Dies geschieht in aller Regel auf Kosten der Bauzeit (aufgrund höherer Schichtanzahl) und spiegelt sich in höheren Baukosten wider. Eine Methode zur Verringerung des Treppenstufeneffekts bei etwa gleicher Wirtschaftlichkeit ist die Optimierung der Bauteilorientierung und der Einsatz variabler Schichtdicken [ByLe06]. Die Substitution äquidistanter Schichten durch eine von einer lokalen Analyse der Oberflächencharakteristik abhängige Schichtverteilung führt zu einer besseren Oberflächenqualität und kann zudem die Anzahl der Schichten verringern und so zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit führen [Schi01]. Diese sogenannte adaptive Schichtzerlegung (engl. *adaptive slicing*) basiert im Wesentlichen auf einer optimierten Bauteilorientierung mit möglichst orthogonal zur Bauplattform ausgerichteten Flächen, da insbesondere stark geneigte Flächen die Bauteilqualität herabsetzen. Die anschließende Wahl der Schichtdicke richtet sich an einer zuvor definierten Toleranz für den Stufenfehler, also den Grad der Formabweichung, und bewegt sich zwischen einem fertigungsbedingten Minimal- und Maximalwert. Trotz einer begrenzten Variationsbreite der Schichtdicke zur Sicherstellung der mechanischen Eigenschaften birgt das Konzept der adaptiven Schichtzerlegung Potenziale zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Neben einer guten Oberflächenqualität gilt es auch die Maßhaltigkeit eines Bauteils zu gewährleisten. So können Geometriespitzen (engl. *peaks*) und ebene Bauteilflächen, die sich zwischen zwei Schnittebenen befinden, nicht mit der uniformen Schichtzerlegungsmethode erfasst werden. Entsprechende Algorithmen in einem adaptiven Slicing-Konzept mit lokal reduzierter Schichtdicke berücksichtigen diese Spezialfälle und tragen zur Einhaltung von Toleranzen bei. Einen Überblick über die unterschiedlichen Ansätze zur adaptiven Schichtzerlegung bietet Abb. 4-6.

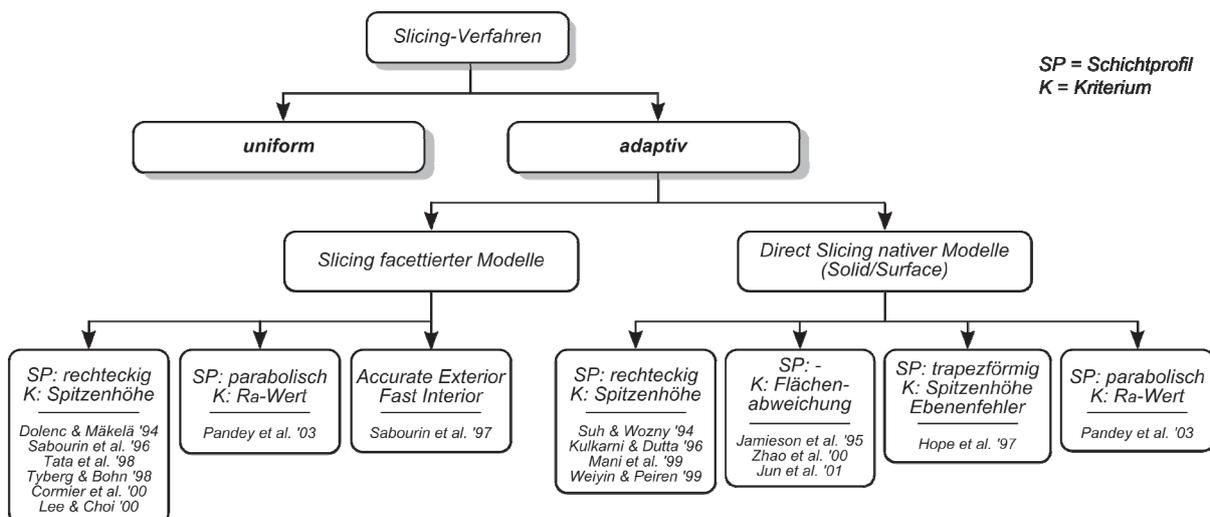


Abb. 4-6: Klassifizierung der Schichtzerlegungsansätze

Die Optimierung der Schichtzerlegung zielt also prinzipiell auf zwei Verbesserungspotenziale ab. Diese sind einerseits die Reduzierung der Schichtanzahl, was zu einer kürzeren Bauzeit und somit zu geringeren Baukosten führt und andererseits die Verbesserung der Bauteilqualität hinsichtlich Oberflächengüte und Maßhaltigkeit. Die Idee der adaptiven Schichtzerlegung verfolgt diese Potenziale und könnte in der Praxis zu nennenswerten Einsparungen sowie Qualitätsverbesserungen führen. Aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich zudem mit der direkten Schichtzerlegung nativer CAD-Daten unter Verwendung variabler Schichtdicken (*Adaptive Direct Slicing*), wobei diese Vorgehensweise in der Praxis bis dato kaum Anwendung findet.

4.4.2 Adaptive Schichtzerlegung

Die (indirekte) adaptive Schichtzerlegung ist eine Methode, die variable Schichtdicken auf Basis von Geometrieänderungen in Baurichtung verwendet. Sofern die Geometrie in einer gegebenen Orientierung es zulässt, also eine lokal ermittelte Differenz zwischen Facetten- und Schichtmodell nicht zu einer Überschreitung eines vordefinierten Toleranzwerts für das Fehlermaß der Geometrieabweichung führt, werden größere Schichtdicken zur Reduzierung der Schichtanzahl verwendet. In Bauteilbereichen, die eine höhere Komplexität aufweisen oder eine besondere Maßhaltigkeit erfordern, wird die Schichtdicke entsprechend reduziert (vgl. Abb. 4-7). Auf diese Weise kann die Schichtdicke adaptiv, also angepasst an die geforderte geometrische Genauigkeit, verändert werden um die Anzahl der Schichten auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren.

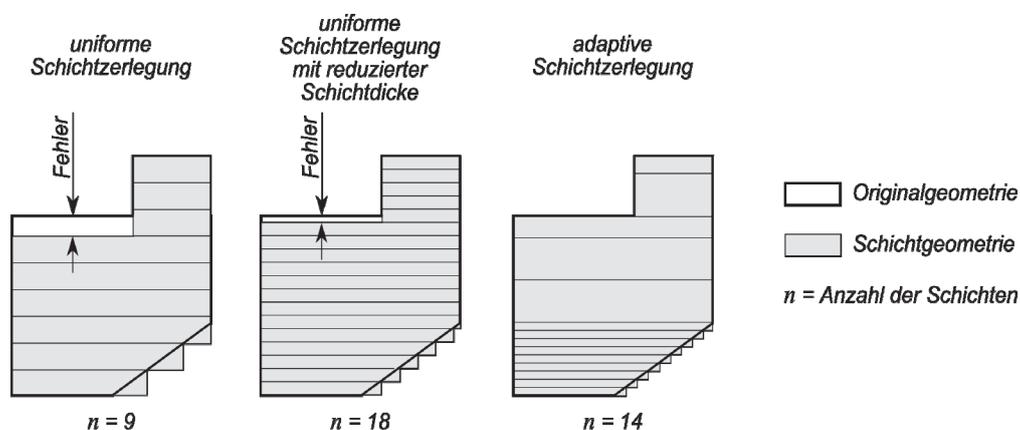


Abb. 4-7: Prinzip der adaptiven Schichtzerlegung

Dabei ist der Optimierung der Wirtschaftlichkeit durch das Herabsetzen der Schichtanzahl eine Grenze gesetzt, die sich durch die je nach Verfahren bzw. Material maximal realisierbare Schichtdicke äußert. Die bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der adaptiven Schichtzerlegung lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- **Inkrementelle Zerlegung** – Das Bauteil wird in einem einzigen Zyklus schichtweise auf die maximal zulässige Schichtdicke hin untersucht. Unterscheidungsmerkmale der entwickelten Konzepte sind die unterschiedlichen Ansätze zur Quantifizierung des Fehlermaßes der Geometrieabweichung.

- **Top-Down-Zerlegung** – Im Gegensatz zur inkrementellen Vorgehensweise erfolgt die Schichtzerlegung zunächst mit einer Maximalschichtdicke. In einem weiteren Schritt werden, je nach Anforderung an die Bauteilgenauigkeit, die einzelnen Schichten iterativ verfeinert.
- **Bottom-Up-Zerlegung** – Das zu fertigende Objekt wird in Schichten minimaler Dicke zerlegt. Anschließend werden aufeinanderfolgende Schichten mit geringen Abweichungen zwischen den Schnittkonturen sequenziell zusammengefasst, so dass sich die Schichtdicke ohne nennenswerte Verringerung der Abbildungsgenauigkeit erhöhen lässt.

Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze vorgestellt, die auf eine Optimierung der Schichtzerlegung durch eine adaptive Vorgehensweise abzielen.

INKREMENTELLE ZERLEGUNG

DOLENC und MÄKELÄ legten den Grundstein für alternative Slicing-Methoden [DoMa94]. In ihrem vorgestellten Ansatz zur adaptiven Schichtzerlegung wird ein Fehlermaß, die Spitzenhöhe c (engl. *cuspl height*), zur Quantifizierung des Stufenfehlers eingeführt. Die Spitzenhöhe c wird in jeder Schicht segmentweise ermittelt und entspricht der größten Abweichung in einem gedachten Fehlerdreieck (siehe Abb. 4-8). Die Schichtdicke lässt sich bis zum Erreichen einer festgelegten Maximalabweichung erhöhen. Auf diesem Konzept bauen zahlreiche Arbeiten der letzten Jahre auf, so z. B. von CORMIER et al., wobei die Festlegung der maximalen Spitzenhöhe auf einer interaktiven Selektion von Bauteilflächen durch den Anwender beruht [CUS00]. TATA et al. verwenden neben der von DOLENC und MÄKELÄ eingeführten Spitzenhöhe noch die in der Schichtebene gemessene maximale Abweichung d sowie die Sehnenlänge δ als zusätzliche mögliche Fehlermaße zur Charakterisierung des Stufenfehlers (Abb. 4-8) [TFBA98]. Voraussetzung ist hier die benutzerdefinierte Festlegung der Toleranzgrenzen für die Fehlermaße, was aufgrund gegebenenfalls variierender Bauteilkomplexität kaum zu realisieren ist.

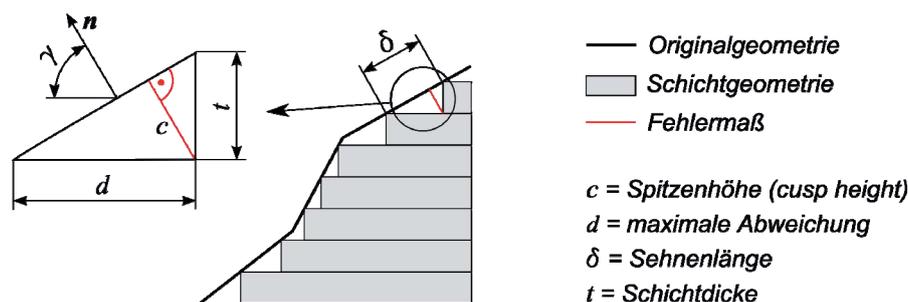


Abb. 4-8: Definition der Spitzenhöhe in einem Fehlerdreieck

Beim Ansatz von SREERAM und DUTTA werden alle Eckpunkte des Polygonnetzes nach ihren z-Werten sortiert [SrDu94]. Dies dient als Grundlage zur schichtweisen Segmentierung des Modells, so dass die entstehenden Sektionen separat auf optimale Schichtdicken anhand der maximal zulässigen Spitzenhöhe untersucht werden. Einen ähnlichen Ansatz (sog. *Region-based Adaptive Slicing*) zur Beschleunigung des Schichtaufbaus verfolgen MANI et al., indem ein Bauteil durch benutzerdefinierte Angaben in Regionen unterschiedlicher Qualitätsanforderungen zerlegt wird [MKD99]. Die Bauteilregionen werden dann getrennt voneinander betrachtet und die optimalen Schichtdicken ermittelt (Abb. 4-9).

Während die zuvor genannten Ansätze von rechteckigen Schichtprofilen ausgehen, wenden PANDEY et al. ein parabolisches Profil an [PRD03]. Als Fehlermaß dient ein benutzerdefinierter Grenzwert für die Oberflächenrauheit R_a . Dieses Konzept konnte erfolgreich an einer FDM-Anlage umgesetzt werden, eignet sich jedoch nicht für andere Verfahren. Im Ansatz von BYUN und LEE finden sich ähnliche Überlegungen, die zur Definition einer lokalen Schichtdicke in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit R_a führen [ByLe06].

TOP-DOWN-ZERLEGUNG

SABOURIN et al. greifen das Cusp-Height-Konzept für eine rekursive Verfeinerung (*Stepwise Uniform Refinement*) eines mit einer einheitlichen Maximalschichtdicke zerlegten Bauteils auf [SHB96]. In einem iterativen Prozess wird anschließend jede Schicht auf mögliche Verfeinerungen unter Einhaltung einer festgelegten Maximalspitzenhöhe hin untersucht. Dabei werden zur genaueren Berücksichtigung von Krümmungsänderungen stets adjazente Schichten in die Betrachtung mit einbezogen. In einer Weiterentwicklung dieses Ansatzes (*Accurate Exterior, Fast Interior*) werden die Querschnittskonturen in Richtung des Bauteilinneren versetzt, so dass lediglich äußere Bauteilbereiche verfeinert werden, während das Innere mit großen Schichtdicken gefertigt wird [SHB97]. Hierdurch kann die Oberflächenqualität durch die feineren Schichten in den Randbereichen aufrecht erhalten werden, während die dicken Schichten im Inneren der Beschleunigung des Fertigungsprozesses dienen (Abb. 4-9).

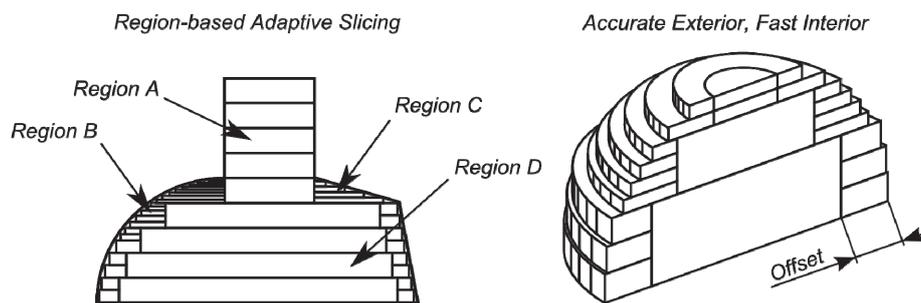


Abb. 4-9: Rekursive Ansätze zur adaptiven Schichtzerlegung ([MKD99], [SHB97])

Ferner wird in [TyBo98] eine Methode zum lokalen adaptiven Slicen vorgestellt, bei der lediglich lokal Schichtverfeinerungen vorgenommen werden, die eine Reduktion der Bauzeit bei gleichzeitiger Steigerung der Oberflächenqualität bewirken. Auf diese Weise werden insbesondere bei mehreren Bauteilen im Bauraum nur Bauteilregionen verfeinert, die höhere Anforderungen an die Oberflächenqualität stellen. Dies führt zu bauteilspezifischen Schichtdicken, setzt jedoch eine entsprechende Regelung in der Anlage zum Einstellen unterschiedlicher Prozessparameter innerhalb einer Schichtebene voraus. Getestet wurde dieses Verfahren lediglich an einer FDM-Anlage.

BOTTOM-UP-ZERLEGUNG

Während die meisten Ansätze auf einer inkrementellen oder Top-Down-Vorgehensweise basieren, entwickelten JENG et al. einen Bottom-Up-Ansatz, indem ein Bauteil zunächst in Schichten mit minimaler Dicke zerlegt wird [JWL00]. Anschließend werden von unten nach oben adjazente Schichten auf die vorhandene Profilabweichung der Querschnittskonturen überprüft. Befindet sich die Abweichung innerhalb einer vorgegebenen Toleranz, so werden die benachbarten Schichten zusammengelegt. Die Anzahl der zusammenlegbaren Schichten

ergibt sich dabei aus dem Quotienten aus der maximalen Schichtdicke t_{max} und der minimalen Schichtdicke t_{min} . Trotz bestechender Einfachheit des Konzepts, garantiert diese Vorgehensweise nicht zwingend eine Erhöhung der Bauteilgenauigkeit. Insbesondere eine uniforme Schichtzerlegung mit feinen Schichtstärken führt nicht notwendigerweise zur Maßhaltigkeit in Baurichtung. Daher eignet sich dieser Ansatz nur zur Reduzierung der Schichtanzahl, jedoch nicht unbedingt zur Verbesserung der Oberflächenqualität.

4.4.3 Direkte adaptive Schichtzerlegung

Die adaptive Schichtzerlegung am CAD-Modell (engl. *direct adaptive slicing*) vermeidet die durch den Tesselierungsprozess entstehende Approximation und erhöht somit die Genauigkeit der darzustellenden Querschnittskonturen. Grundlage der zu diesem Teilproblem entwickelten Ansätze ist in der Regel die Auswertung der lokalen Flächenkrümmung, wobei jedoch auch alternative Konzepte veröffentlicht wurden. Im Folgenden werden kurz die wesentlichen Arbeiten der adaptiven Schichtzerlegung an nativen CAD-Daten vorgestellt.

JAMIESON und HACKER [JaHa95] zerlegen ein CAD-Modell mit einer Standard-Schichtdicke und vergleichen anschließend adjazente Konturen. Befinden sich die Abweichungen innerhalb einer festgelegten Toleranz, so wird die Schichtdicke schrittweise bis zur Toleranzgrenze erhöht. Überschreiten die Abweichungen die Grenzwerte, so wird eine Zwischenschicht erzeugt und erneut auf Einhaltung des Toleranzbereichs untersucht. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes findet sich in [ZhLa00]. Darüber hinaus existieren weitere Ansätze, die eine exakte mathematische Beschreibung der Schnittkonturen an einem CAD-Modell zur Reduzierung geometrischer Abweichungen in der x-y-Ebene fokussieren [LeCh00]. Die adaptive Schichtzerlegung erfolgt mit dem bewährten Fehlermaß der Spitzenhöhe. So verwenden CHEN et al. anstelle neutraler CAD-Daten vielmehr proprietäre *PowerSHAPE*-Modelle zur Berechnung der Schnittkonturen [CWY01]. SUN et al. verwenden ebenfalls *PowerSHAPE*-Modelle, berechnen die lokale Schichtdicke jedoch anhand zwei verschiedener Kontur-Sets [SCL07]. So wird ein Bauteil zunächst in x- und anschließend in y-Richtung geschnitten (z-Richtung = Baurichtung). Die entstandenen Kurven werden anschließend diskretisiert, so dass die resultierenden Punktegruppen zur Schichtdickenkalkulation herangezogen werden können. KOC wendet in seinem Ansatz das sogenannte *Biarc-Curve-Fitting* zur Approximation der Querschnittskonturen durch bogenförmige Kurvenstücke mit G^1 -Stetigkeit⁷ (Biarcs) an, so dass hierdurch die maximal zulässige Spitzenhöhe heraufgesetzt werden kann [Koc01].

SUH und WOZNY [SuWo94] sowie KULKARNI und DUTTA [KuDu95], [KuDu96] verwenden anstelle eines extrapolierenden Ansatzes zur Bestimmung der lokalen Oberflächenkrümmung ρ oberhalb einer betrachteten Schicht eine Kugel zur Approximation mit Radius $r=\rho$ und Kugelmittelpunkt S . Die maximale Schichtdicke berechnet sich dann an einem Punkt P als Funktion des Kugelradius, der maximal zulässigen Spitzenhöhe und dem Winkel θ zwischen der Horizontalen und der Strecke SP . HOPE et al. [HRJ97] greifen dieses Konzept auf und wenden differentialgeometrische Methoden zur besseren Abschätzung der Modelloberfläche an. Ähnliche Überlegungen finden sich in [Xu97], [DKO97] und [MBH04]. JUN et al. verwenden sogenannte Topologieübergangspunkte (engl. *topology transition points*) zur Kennzeichnung

⁷ Eine Kurve gilt als G^1 -stetig, falls sie in jedem Punkt eine Tangente aufweisen kann.

von Topologieänderungen innerhalb von Flächen, so dass die um diese Punkte ermittelten Schnittkurven die Grundlage der Schichtdickenberechnung bilden [JKL01].

ZHOU erweitert das Konzept der adaptiven Schichtzerlegung um die Berücksichtigung funktional gradierter Materialien [Zhou04]. Hierbei wird ein Bauteil mit gradierten Materialeigenschaften in Blöcke zerlegt, die sich an den in Baurichtung sortierten Eckpunkten des Modells orientieren. Neben der Erzeugung geometrischer Schichten sieht ZHOU auch Schichten zur Definition der Materialverteilung vor. Die optimale Schichtdicke richtet sich an den hierfür unabhängig voneinander berechneten Schichtdicken der Geometrie- bzw. Materialschicht.

Im Gegensatz zu der zumeist zweidimensionalen Betrachtungsweise zur Quantifizierung eines Fehlermaßes, verfolgen KUMAR und CHOUDHURY einen dreidimensionalen Ansatz, indem die Volumenabweichung zwischen CAD- und Schichtenmodell berechnet wird [KuCh05]. Hierzu führen die Autoren das sogenannte Spitzenvolumen (3D) in Analogie zur Spitzenhöhe (2D) ein. Die hierdurch genauere Quantifizierung des Treppenstufeneffekts führt bei Festlegung eines Grenzwerts für das zulässige Spitzenvolumen zur Ermittlung einer optimalen Schichtdicke.

Neben den klassischen Schichtzerlegungsmethoden, existieren auch Ansätze zur multidirektionalen Zerlegung. Dies setzt jedoch Verfahren mit einem Mehrfreiheitsgrad-Materialauftrag voraus. DUTTA und SINGH streben in ihrem Ansatz eine Dekomposition des zu fertigenden Bauteils an, so dass sich die einzelnen Bestandteile unter verschiedenen Richtungen in Schichten zerlegen lassen [DuSi01]. Dies kann zu einer Erhöhung der Oberflächengenauigkeit sowie zur Reduzierung von Stützkonstruktionen führen. Diese Strategie wurde jedoch bisher an keiner Anlage umgesetzt und ist nicht auf Verfahren mit pulverförmigem oder flüssigem Ausgangsmaterial anwendbar.

4.4.4 Fazit

Zahlreiche verschiedene Ansätze zur adaptiven Schichtzerlegung wurden in den vergangenen Jahren entwickelt. Handelt es sich dabei um Facettenmodelle, so lässt sich feststellen, dass hierdurch eine Reduzierung des Treppenstufeneffekts und somit die Erhöhung der Oberflächengenauigkeit erreicht werden kann. Zudem kann dies zu einer besseren Wirtschaftlichkeit aufgrund geringerer Schichtanzahl gegenüber einer feinen uniformen Schichtzerlegung führen. Da die Querschnittskonturen der Facettenmodelle stets eine Approximation der tatsächlichen Geometrie darstellen, wurden die Konzepte zur adaptiven Schichtzerlegung auf native 3D-CAD-Daten erweitert, die in der Theorie zu einer genaueren Darstellung der Schnittkonturen führen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Steuerungen der generativen Anlagen dies auch umsetzen können. Da es sich hier zumeist um vektorielle Steueranweisungen handelt, werden die ermittelten Konturdaten letztendlich durch einen Polygonzug approximiert, so dass der Vorteil der exakten Konturbeschreibung relativiert wird [ChKw02]. Eine weitere Voraussetzung ist, dass die Anlagen über eine ausreichend hohe Genauigkeit verfügen müssen, um die genaueren Schichtdaten abbilden zu können. Solange dies nicht der Fall ist, beschränkt sich der Vorteil der direkten adaptiven Schichtzerlegung auf die Umgehung des Handlings mit einem Facettenmodell und somit auf die Beschleunigung des Slicing-Prozesses. Zudem kommt der Vorteil adaptiver Schichtdicken nur bei typischen Bauteilen des Maschinenbaus zum Tragen, während dies für z. B. medizinische Anwendungen keinen Mehrwert

darstellt. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die derzeit noch bestehenden technischen Limitierungen der adaptiven Schichtzerlegung dazu geführt haben, dass dieses Schichtzerlegungskonzept bislang in keiner Serienanlage umgesetzt wurde.

4.5 Ansätze zur Unterstützung der Prozessvorbereitung

Neben den zuvor genannten Ansätzen zur Optimierung von Teilaufgaben der Prozessvorbereitung existieren allgemeine Ansätze, die den Anwender während der gesamten Vorbereitungsphase unterstützen sollen. So wurde an der Universität Bremen im Rahmen eines EU-Projekts (Brite/EuRam IV-3285) ein Werkzeug zur allgemeinen Unterstützung entwickelt [JoMe99]. Schwerpunkt des Forschungsprojekts *RapidWork* war die Umsetzung geeigneter Methoden und Werkzeuge für die GF-gerechte Datenaufbereitung und Prozessplanung. Verifikations- und Reparaturfunktionen sollen die Sicherstellung der Datenqualität ermöglichen. Neben der Erzeugung von Stützkonstruktionen und Hatches umfassen die prozessvorbereitenden Module vorwiegend die Positionierung des Bauteils im Bauraum sowie die Anbindung an GF-Folgeprozesse. Die Bauteilorientierung bleibt bei diesem Ansatz gänzlich unberücksichtigt. Weitere Ansätze adressieren ebenfalls die allgemeine Prozessvorbereitung ([WSR01]), die Verfahrensauswahl ([Kas99], [Bor10]) oder beschränken sich auf die Pfadplanung ([HJDS02], [JPM98]).

4.6 Fazit zum Stand der Wissenschaft

Die in diesem Kapitel aufgeführten wissenschaftlichen Ansätze zur Umsetzung der in Abschnitt 3.1 aufgezeigten Potenziale sind vielfältiger Natur, adressieren die Teilproblematiken jedoch stets unter eingeschränkten Gesichtspunkten. So zeigt sich, dass die unterschiedlichen Konzepte zur Optimierung der hier vorgestellten Aspekte (Datentransfer, Bauteilorientierung, Bauraumausnutzung und Schichtzerlegung) voneinander isoliert entwickelt wurden. Adaptive Schichtzerlegungskonzepte zeigen deutliche Potenziale, werden jedoch aufgrund des bestehenden Datenformats STL mit geringer Wahrscheinlichkeit Einzug in die Praxis halten. Vielmehr wird erst ein Wechsel des Datenformats die dafür notwendige Speicherung exakter Geometriedaten und Semantik ermöglichen [Dan09]. Hierauf aufbauend lassen sich in weiteren Prozessschritten die orientierungsabhängigen Effekte analysieren, quantifizieren und schließlich der gesamte Fertigungsprozess optimieren. Da die Substitution des STL-Formats in absehbarer Zeit derzeit unwahrscheinlich erscheint, wird in dieser Arbeit der De-facto-Standard als Grundlage der Orientierungsoptimierung gewählt. Dennoch werden Konzepte zum Transfer erweiterter Bauteilinformationen im STL-Format vorgestellt. Die umfassende Betrachtung der hier aufgezeigten Wechselwirkungen fließt in die Entwicklung des Optimierungskonzeptes ein. So sollen wesentliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die die Bauteil- oder Prozessqualität beeinträchtigen. Zudem sind die in diesem Kapitel erläuterten Arbeiten dadurch gekennzeichnet, dass sie häufig fern der Praxis übliche Einschränkungen aufweisen (z. B. konvexe Geometrien). Die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte heben sich daher insofern von den bisherigen Arbeiten ab, als dass sie für beliebige Körper gelten und auf einer ganzheitlichen Betrachtung basieren.

5 Algorithmen zur Lösung geometrischer Teilprobleme

Betrachtet man nach dem Stand der Technik die für generative Fertigungsverfahren verwendeten Datenstrukturen, so fällt auf, dass es sich stets um Approximationen der Originalgeometrie handelt. Die prägnanteste Eigenschaft dieser Darstellung ist, dass ausschließlich Punktmengen zur Beschreibung der Bauteilgeometrie verwendet werden. So wird beispielsweise im De-facto-Standard STL ein Bauteil durch die Angabe von Punkten beschrieben, während eine Definition der Flächen lediglich über die Referenzierung der aufspannenden Eckpunkte erfolgt. Daher sieht das in der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegte Konzept die Abstraktion der realen Bauteilgeometrie mit den aus fertigungstechnischer Sicht formulierten Anforderungen vor. So werden die betrachteten Körper auf geometrische Grundelemente reduziert, so dass die dafür gültigen Berechnungsvorschriften der analytischen Geometrie zur Analyse und Manipulation beliebiger Objekte angewendet werden können. Eine mathematische Formulierung der fertigungstechnischen Randbedingungen berücksichtigt schließlich die individuellen Anforderungen an den Fertigungsprozess. Dieses Kapitel beinhaltet daher die Ansätze zur Lösung geometrischer Teilprobleme der hier betrachteten Optimierungsaufgabe. Wesentliches Werkzeug zur Umsetzung des Konzepts stellen die Methoden der algorithmischen Geometrie dar, so dass zunächst elementare Operationen vorgestellt werden, die in dieser Arbeit mehrfach Anwendung finden. Anschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung zur Lösung der Teilaufgaben.

5.1 Anwendung der Algorithmischen Geometrie

Die *Algorithmische Geometrie* (engl. *computational geometry*), als Teilgebiet der Informatik, beschäftigt sich mit der algorithmischen Lösung geometrisch formulierter Problemstellungen sowie der Bestimmung der Komplexität⁸ geometrischer Probleme. Gegenstand der Betrachtung ist hierbei die Speicherung und Verarbeitung geometrischer Daten, wobei vorwiegend mit geometrischen Strukturelementen wie Punkten, Kurven und Flächen gearbeitet wird. Die Verfahren der algorithmischen Geometrie finden sich in Anwendungsgebieten wieder wie in der Computergrafik [DeB00], CAGD (*Computer Aided Geometric Design*) [BoTe07], Geoinformationssystemen (GIS) [FPM99], [OK06] oder auch als neueste Anwendung, der Robotik [GoOR04], [PrSh85]. Die Grundlagen der algorithmischen Geometrie gehen auf SHAMOS [Sha78] zurück und besitzen heute noch in dieser Form ihre Gültigkeit. Bei der in dieser Arbeit zu lösenden Optimierungsaufgabe liegt der Fokus auf den geometrischen Problemstellungen, so dass im Folgenden elementare Algorithmen, die in der Arbeit Anwendung finden,

⁸ Unter Komplexität eines Algorithmus versteht man in der Regel den maximalen Ressourcenbedarf, wie die Anzahl der benötigten Rechenschritte (Zeitkomplexität) oder den Speicherbedarf (Platzkomplexität).

vorgestellt werden. Bei zeitkritischen Anwendungen gibt die angegebene Zeitkomplexität Aufschluss über das Laufzeitverhalten. Die asymptotische Laufzeit eines Algorithmus wird in Abhängigkeit der Eingabe n und unter Verwendung der Landau-Notation⁹ abgeschätzt.

5.1.1 Begriffsdefinitionen

Die in dieser Arbeit behandelte Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung basiert auf einer Abstraktion der geometrischen Zusammenhänge. Zur Überführung der rein geometrischen Daten zur Bauteildarstellung in die für die algorithmische Geometrie geeignete mathematische Beschreibung werden daher in diesem Abschnitt grundlegende Begriffe der linearen Algebra sowie Notationen eingeführt. Diese algebraischen Hilfsmittel finden im weiteren Verlauf zur Lösung geometrischer Problemstellungen (Analytische Geometrie) der Mehrzieloptimierung Anwendung.

DEFINITION 5.1

Es seien m Punkte p_1, p_2, \dots, p_m im \mathbb{R}^k gegeben. Die Menge aller Punkte $P = \alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 + \dots + \alpha_m p_m$ ($\alpha_i \in \mathbb{R}$) wird als **Linearkombination** der Punkte p_1, p_2, \dots, p_m bezeichnet. Gilt weiterhin $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m = 1$, so ist P eine **Affinkombination** der Punkte.

Nach dieser Definition sind Geraden und Ebenen lineare Mengen im \mathbb{R}^3 , wenn diese durch den Ursprung verlaufen. Nehmen sie beliebige Positionen im Raum ein, so handelt es sich um affine Mengen.

DEFINITION 5.2

Eine Affinkombination P bezeichnet man als **Konvexkombination**, wenn alle Koeffizienten $\alpha_i \in \mathbb{R}$ positiv sind. Entsprechend stellen die Punkte $p_1, p_2, \dots, p_m \in P$ die **konvexe Menge** von P dar. Die **konvexe Hülle** $\text{conv}(P)$ der Menge P ist dann die kleinste konvexe Menge, die P enthält.

Ein Dreieck besteht somit aus allen Konvexkombinationen seiner 3 Eckpunkte. Analog besteht ein Tetraeder aus allen Konvexkombinationen seiner 4 Eckpunkte. Die konvexe Hülle einer Menge stellt die Basis zahlreicher algorithmischer Operationen dar. Auch in dieser Arbeit findet sie mehrfach Anwendung. Daher wird die mathematische Anschauung der konvexen Hülle im weiteren Verlauf um eine geometrische Definition ergänzt (Abschnitt 5.1.4). Ein weiterer elementarer Baustein der algorithmischen Geometrie ist das sogenannte *Polytop*. Ein Polytop kann als die konvexe Hülle einer endlichen Menge von Punkten im k -dimensionalen Raum (\mathbb{R}^k) definiert werden [JoTh07].

DEFINITION 5.3

Eine Menge $P \subseteq \mathbb{R}^k$ wird als **konvexes Polytop** bezeichnet, wenn sie als konvexe Hülle endlich vieler Punkte bzw. als Durchschnitt endlich vieler Halbräume dargestellt werden kann. Ein **Polytop** stellt somit die Vereinigung endlich vieler konvexer Polytope der gleichen Dimension dar.

⁹ Die Landau-Notation wird verwendet, um das asymptotische Verhalten eines Algorithmus bei Annäherung an einen endlichen oder unendlichen Grenzwert zu beschreiben. Das Landau-Symbol O wird verwendet, um eine maximale Größenordnung (obere Schranke) anzugeben. Ω dagegen beschreibt eine untere Schranke.

Dabei besteht ein Halbraum aus einer (Hyper-)Ebene und einer der beiden offenen Mengen, die durch die Teilung des Raums durch die Ebene entstehen. Vom Standpunkt der Analysis ist also ein Polytop eine beschränkte Teilmenge des \mathbb{R}^k . Die leere Menge ist ebenfalls ein Polytop (mit $k = -1$). In der Geometrie wird ein k -dimensionales Polytop oft auch als k -*Polytop* bezeichnet. Für ein Polytop der Dimension $k = 2$ (\mathbb{R}^2) wird der Begriff *Polygon* verwendet. Kann die konvexe Hülle einer Punktmenge Q mit $k+1$ linear unabhängigen Punkten dargestellt werden, so handelt es sich um ein k -*Simplex* (Abb. 5-1). Anders ausgedrückt stellt ein k -Simplex das einfachste Polytop in der Dimension k dar.

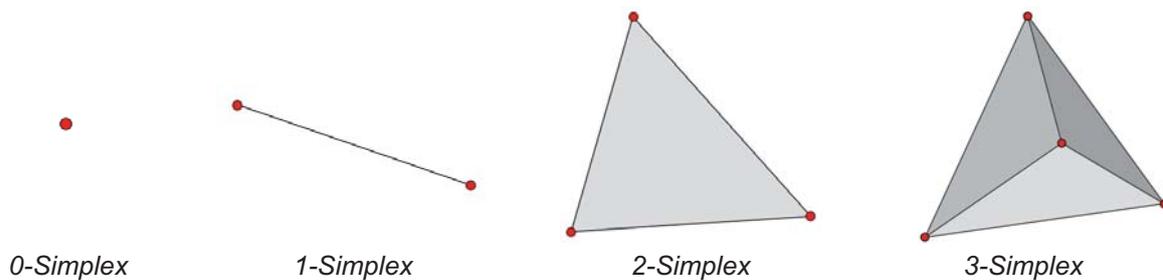


Abb. 5-1: Simplexes im \mathbb{R}^k (mit $k = 0, 1, 2, 3$)

DEFINITION 5.4

Ein k -dimensionales Polytop wird **Simplex** genannt, wenn es die konvexe Hülle einer Punktmenge P mit $k+1$ Punkten darstellt.

Ein Simplex S , welches durch eine nichtleere Teilmenge der Eckpunkte von S aufgespannt wird, heißt *Untersimplex* oder *Facette* von S . Je nach Dimension k unterscheidet man 0-Facetten (Eckpunkte oder *Vertices*), 1-Facetten (Kanten oder *Edges*) und $(k - 1)$ -Facetten (Seitenflächen oder *Faces*).

DEFINITION 5.5

Sei $P \subseteq \mathbb{R}^k$ ein k -Polytop. Der Durchschnitt $P \cap H$ von P mit einer Hyperebene H wird als (echte) **Seite** oder **Facette** von P bezeichnet. Unechte Seiten stellen die leere Menge und P selbst dar. Ein Polytop heißt **Simplexial**, wenn alle echten Seiten (Facetten) von P Simplexes darstellen.

Eine Verallgemeinerung der Polytope auf unbeschränkte Körper führt zur Menge der *Polyeder*.

DEFINITION 5.6

Eine Menge $P \subseteq \mathbb{R}^k$ wird als **Polyeder** bezeichnet, wenn sie als Durchschnitt endlich vieler abgeschlossener Halbräume dargestellt werden kann.

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff „Polyeder“ häufig als Synonym für Polytope, also für beschränkte konvexe Polyeder, verwendet. Da ein Polytop stets einen Unterraum eines Polyeders darstellt, wird im Folgenden der Begriff „Polyeder“ für die geometrische Beschreibung einer allgemeinen Punktmenge im \mathbb{R}^3 verwendet. Ohne dass Definition 5.5 ihre Gültigkeit verliert, wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Begriff „Facette“ zur Beschreibung der Seitenfläche eines Polyeders verwendet.

Für Anwendungen der algorithmischen Geometrie werden häufig polygonale Netze (engl. *polymesh*) mit dreieckigen Polygonen verwendet. Diese sind einfach zu speichern und ermöglichen die einfache mathematische Beschreibung geometrischer Operationen [AuSp92]. Polygonnetze müssen dabei folgende Bedingungen erfüllen:

- Jeder Eckpunkt (Vertex) muss mindestens einer Kante (Edge) angehören.
- Jede Kante muss mindestens einer Fläche (Face) angehören.
- Wenn zwei Flächen sich schneiden, muss der Schnittpunkt bzw. die Schnittkante eine Komponente des Polygonnetzes sein.

Polyeder stellen demzufolge polygonale Netze dar, wobei jedoch zusätzlich die Bedingung erfüllt sein muss, dass sich zwei Flächen genau eine Kante teilen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird davon ausgegangen, dass es sich bei Polygonnetzen stets um Polyeder handelt, also dass alle oben genannten Bedingungen erfüllt werden.

DEFINITION 5.7

Sei $M \subseteq \mathbb{R}^k$. Zerlegt man M in eine Menge von Teilmengen $Z_1, \dots, Z_n \subseteq M$, so dass jede Teilmenge Z_i ein simpliziales Polytop ist, dann spricht man von einer **Triangulierung**.

5.1.2 Algorithmische Operationen

Die algorithmische Lösung geometrischer Probleme erfordert zum Teil häufig wiederkehrende mathematische Operationen, die als algorithmische Elementaroperationen bezeichnet werden. Im Folgenden sollen einige Elementaroperationen aufgezeigt werden, die im weiteren Verlauf Anwendung finden. Darüber hinaus werden selbst entwickelte oder modifizierte Algorithmen vorgestellt, die als Werkzeug zur Lösung der vorliegenden Optimierungsaufgabe eingesetzt werden.

5.1.2.1 Dreieckoperationen

Die elementarste der in dieser Arbeit durchzuführenden mathematischen Operationen stellt die Berechnung des Flächeninhalts eines beliebigen Dreiecks dar. Alternativ zur Flächenformel nach HERON lässt sich der Flächeninhalt mit Hilfe der Höhenformel berechnen. Eine Vektorformulierung führt schließlich unter Einbeziehung von zwei aufspannenden Vektoren \mathbf{a} und \mathbf{b} zu:

$$A = \frac{1}{2} |\mathbf{a} \times \mathbf{b}| \quad (5.1)$$

Eine weitere grundlegende Aufgabe stellt die Ermittlung einer Flächenorientierung dar. In der algorithmischen Geometrie und auch im vorliegenden Fall der für die Rapid-Technologie typischen Facettenmodelle im STL-Format stellen die Flächen in der Regel Dreiecke dar, so dass sich für die Bestimmung der Dreiecksorientierung zwei Möglichkeiten ergeben:

1. **Berechnung der Flächennormalen** – Bildung des Kreuzprodukts zweier das Dreieck aufspannenden Vektoren nach Gleichung (5.2) unter Beachtung der Vertex-Reihenfolge („Rechte-Hand-Regel“, vgl. Abb. 5-2).

$$\mathbf{n} = \mathbf{u} \times \mathbf{v} = \begin{pmatrix} u_y v_z - u_z v_y \\ u_z v_x - u_x v_z \\ u_x v_y - u_y v_x \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0, \quad \mathbf{v} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0 \quad (5.2)$$

2. **Berechnung des Volumenvorzeichens** – Ermittlung des Vorzeichens eines aus den Dreieckspunkten p_i ($i = 0, 1, 2$) und eines Bezugspunktes q aufgespannten Tetraeders (Abb. 5-2, siehe auch Abschnitt 5.1.2.4).

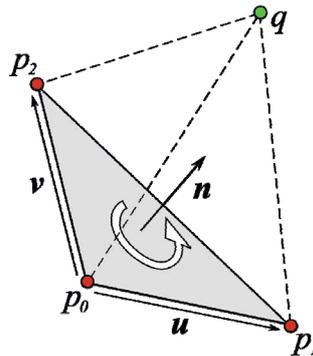


Abb. 5-2: Dreiecksorientierung

Die Anwendung der Gleichung (5.2) führt zu der Konvention, dass zur Definition eines Dreiecks die Eckpunkte entgegen dem Uhrzeigersinn angegeben werden, wenn der Normalenvektor in Richtung des Betrachters zeigt.

5.1.2.2 Halbraumtest

Der Halbraumtest ist für Problemstellungen anzuwenden, die sich mit der Lage eines Punktes x im \mathbb{R}^3 relativ zu einer Ebene oder ebenen Fläche befassen. Hierzu verwendet man die Normalenform der Ebenengleichung mit Stützvektor \mathbf{a} und Normalenvektor \mathbf{n} der Ebene E .

$$E : \mathbf{n} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{a}) = 0 \quad (5.3)$$

Eine Ebene teilt den euklidischen Raum in zwei Halbräume, so dass sich jeder Punkt x , für den die linke Seite der obigen Gleichung > 0 wird, auf der „positiven“ Seite (in positiver Normalenrichtung) der Ebene befindet. Wird die linke Seite < 0 , so befindet sich der Punkt entsprechend auf der „negativen“ Seite der Ebene. Gilt die obige Gleichung (also $= 0$), so befindet sich der Punkt naturgemäß in der Ebene. Dieser Test findet in der vorliegenden Arbeit mehrfach Anwendung und ermöglicht zum Beispiel die Ermittlung von Leerräumen zur Lösung des Packproblems bei der Optimierung des Bauraums einer GF-Anlage. Des Weiteren wird dieser Algorithmus für die Simulation der Schichtzerlegung angewendet. Eine schnelle Möglichkeit zur Überprüfung, ob ein Punkt im \mathbb{R}^2 links oder rechts einer gegebenen Gerade liegt, bietet der Halbebenentest. Die Berechnung des Flächeninhalts des Dreiecks, welches vom Startpunkt p und Endpunkt q der gerichteten Geraden sowie vom zu untersuchenden Punkt r aufgespannt wird, gibt unter Berücksichtigung der positiven Reihenfolge der Dreieckspunkte (entgegen dem Uhrzeigersinn) Aufschluss über die Lage des Punktes. Ein links von der Geraden liegender Punkt führt zu einem positiven Wert. Entsprechend bedeutet ein

negativer Wert für den Flächeninhalt, dass sich der Punkt rechts von der Geraden befindet. Ist der Wert gleich 0, so liegt der Punkt genau auf der Geraden. Zur Ermittlung der Dreiecksfläche A wird unter Verwendung von Gleichung (5.1) die Determinante wie folgt berechnet:

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} p_x & p_y & 1 \\ q_x & q_y & 1 \\ r_x & r_y & 1 \end{vmatrix} = (r_x - p_x) \frac{r_y + p_y}{2} + (q_x - r_x) \frac{q_y + r_y}{2} + (p_x - q_x) \frac{p_y + q_y}{2} \quad (5.4)$$

Für häufig wiederkehrende Untersuchungen dieser Art bietet sich die Speicherung der Halbebenen für jede Gerade an. Auf Kosten weiteren Speicherplatzbedarfs führt diese Vorgehensweise nach [Hec94] zu einem außerordentlich schnellen Algorithmus zur Beantwortung dieser Fragestellung.

5.1.2.3 Flächeninhalt eines Polygons

Eine elementare Aufgabe der algorithmischen Geometrie ist die Berechnung des Flächeninhalts eines Polygons. Im Fall eines mindestens konkaven Polygons P (keine sich schneidenden Kanten) kann hierzu ein beliebiger Punkt q im Inneren gewählt werden. Die Summe der Flächeninhalte der aus den Kanten des Polygons P und des Punktes q gebildeten Dreiecke ergibt den Flächeninhalt A des Polygons. Diese Vorgehensweise behält auch bei der Wahl eines sich außerhalb des Polygons befindlichen Punktes q ihre Gültigkeit, wenn bei der Berechnung der Flächeninhalte der Dreiecke nach Gleichung (5.1) das Vorzeichen ihrer Orientierung berücksichtigt wird. Dies gilt auch für Polygone mit Löchern, wenn stets die in Abschnitt 5.1.2.1 getroffene Konvention des Umlaufsinnus eingehalten wird (Abb. 5-3). So werden Außenkanten entgegen, Innenkanten jedoch mit dem Uhrzeigersinn durchlaufen.

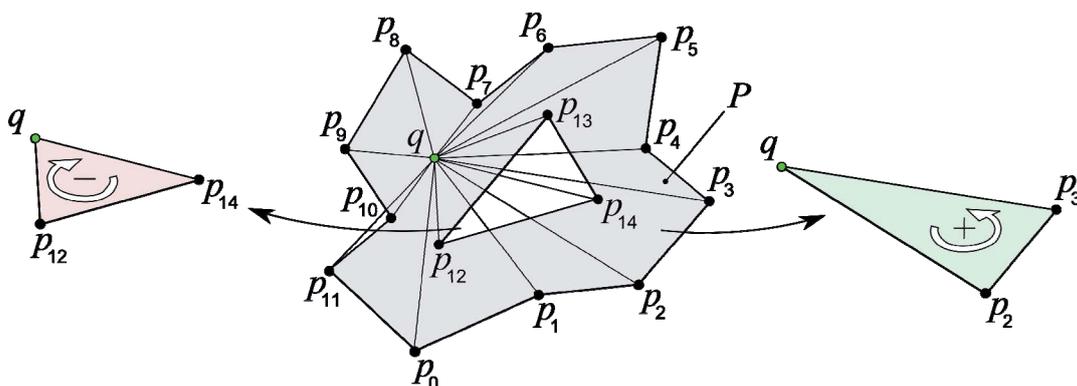


Abb. 5-3: Ermittlung eines Polygon-Flächeninhalts

Eine alternative und zugleich programmieretechnisch elegante Möglichkeit zur Berechnung des Flächeninhalts A eines Polygons P mit n Eckpunkten erfolgt mit der Berechnung von Determinanten, wobei jede einzelne Determinante die Fläche eines Rechtecks ergibt, das durch jeweils zwei aufeinanderfolgende Eckpunkte des Polygons definiert wird:

$$A = \frac{1}{2} \left(\begin{vmatrix} x_0 & y_0 \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} x_{n-1} & y_{n-1} \\ x_0 & y_0 \end{vmatrix} \right) \quad (5.5)$$

Die beiden dargestellten Verfahren finden in der späteren Umsetzung der Orientierungsoptimierung mehrfach Anwendung, so z. B. zur Ermittlung von Schichtinformationen, zur Überprüfung der Bauteilstabilität sowie zur Bestimmung von potenziellen Temperaturgradienten. Aus Sicht der effizienten Programmierung eignen sich beide Verfahren, wobei die Anwendung von dem vorliegenden Datensatz zur Beschreibung des Polygonzugs abhängig ist.

5.1.2.4 Volumen eines Polyeders

Analog zur Berechnung des Flächeninhalts eines Polygons lässt sich das Volumen eines Polyeders P bestimmen, indem der Körper mit Hilfe eines beliebigen Bezugspunktes q in beliebige Tetraeder T_i zerlegt (siehe Abb. 5-4) und somit das Problem auf die Volumenberechnung eines 3-Simplex reduziert wird.

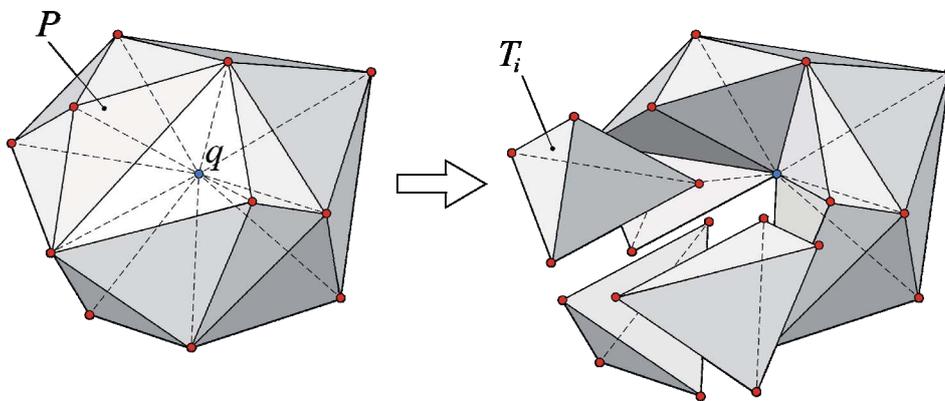


Abb. 5-4: Ermittlung eines Polyeder-Volumens

Das Gesamtvolumen eines Polyeders ergibt sich somit aus der Summe aller Teilvolumina. Das Volumen V_T eines durch drei Vektoren \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} aufgespannten Tetraeders ergibt sich durch folgende Gleichung:

$$V_T(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}) = \frac{1}{6} |(\mathbf{u} \times \mathbf{v}) \cdot \mathbf{w}| \quad (5.6)$$

In der Regel werden in der algorithmischen Geometrie die Kanten beschreibenden Vektoren nicht abgespeichert, sondern lediglich die Eckpunkte eines Polyeders (vgl. auch Abschnitt 5.1.5). Aus diesem Grund bietet sich eine allgemeine Form der Berechnung eines Tetraeders unter Verwendung der Ortsvektoren der Eckpunkte \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , \mathbf{d} an:

$$V_T(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}) = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z & 1 \\ b_x & b_y & b_z & 1 \\ c_x & c_y & c_z & 1 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{vmatrix} \quad (5.7)$$

Trotz deutlich höherem Rechenaufwand zur Lösung der Determinante eignet sich Gleichung (5.7) besser zur Berechnung eines Tetraeder-Volumens, da hier die algorithmische Erfassung der aufspannenden Vektoren vermieden wird. Dies führt zu übersichtlicherem Code und Einsparungen in der Speicherverwaltung, insbesondere in der dynamischen Speicherzuweisung.

5.1.2.5 Ebener Schnitt eines Polyeders

Eine der häufigsten in dieser Arbeit durchzuführenden Operationen stellt der Schnitt eines Polyeders mit einer Ebene dar (Abb. 5-5, links). Da es sich hier stets um Dreiecksnetze handelt, kann diese Aufgabe durch mehrfache Anwendung einer Ebene-Dreieck-Durchdringung gelöst werden. Der echte Schnitt eines Dreiecks T mit einer Ebene E bedeutet, dass mindestens ein Eckpunkt p_i oberhalb und ein Eckpunkt p_j unterhalb der Schnittebene liegt (Abb. 5-5, rechts).

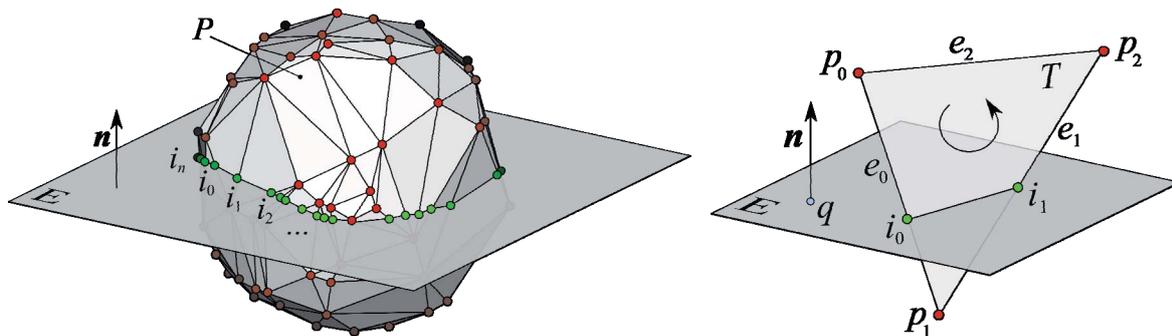


Abb. 5-5: Durchdringungskurven (Ebene – Polyeder, Dreieck)

Durch Anwendung des Halbebenentests (Abschnitt 5.1.2.2) an jedem Punkt des Dreiecks kann ermittelt werden, ob sich der jeweilige Punkt auf der positiven oder negativen Seite der Ebene befindet. Befinden sich mindestens zwei Eckpunkte auf unterschiedlichen Seiten der Ebene, so müssen die Schnittpunkte i_0 und i_1 ermittelt werden. Betrachtet man die Parameterform der Dreiecksseite $e_0(p_0, p_1)$, dann gilt für den Schnittpunkt i_0

$$e_0 : i_0 = p_0 + t(p_1 - p_0). \quad (5.8)$$

Da der Schnittpunkt auch Bestandteil der Ebene E ist, gilt ebenso

$$E : \mathbf{n} \cdot (i_0 - \mathbf{q}) = 0. \quad (5.9)$$

Somit ergibt sich für den Parameter t

$$t = \frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p}_0)}{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0)}. \quad (5.10)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (5.8) und (5.10) lässt sich schließlich der Schnittpunkt i_0 ermitteln. Nicht in jedem Fall ist jedoch sichergestellt, dass aus der Durchdringung eines Dreiecks mit einer Ebene stets eine wie in Abb. 5-5 dargestellte Schnittkurve resultiert. In Abb. 5-6 sind einige mögliche Sonderfälle dargestellt, die mit den oben genannten Gleichungen berechnet werden können, jedoch besonderer Aufmerksamkeit für Anwendungen der algorithmischen Geometrie bedürfen. Insbesondere die in dieser Arbeit notwendige Ermittlung von Schnittkurven zwischen einer Ebene und einem Polyeder erfordert eine Fallunterscheidung zur Vermeidung unnötig hoher Laufzeiten. Die hierfür durchzuführenden Schritte werden im Abschnitt 7.3.5 erläutert.

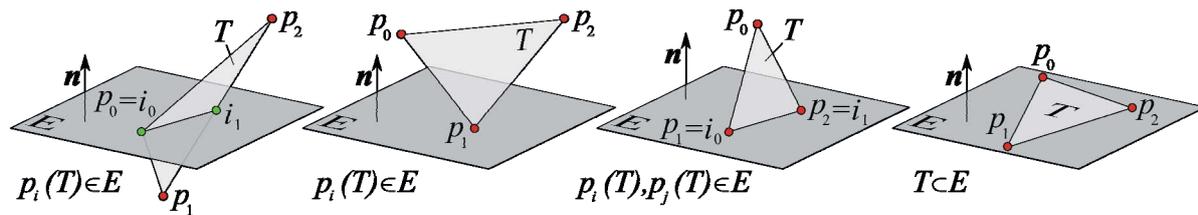


Abb. 5-6: Sonderfälle der Ebene-Dreieck-Durchdringung

5.1.2.6 Triangulierung

Formal gesehen beschreibt eine Triangulierung die Zerlegung einer Punktmenge in simpliziale Polytope (siehe DEFINITION 5.7). In dieser Arbeit werden Polygonnetze geschnitten und die resultierenden Schnittflächen sowie Schichtvolumina berechnet. Hierzu ist es notwendig, dass das Schnittpolygon trianguliert wird. Ein geschlossenes Polygon P gilt als trianguliert, wenn es vollständig in Dreiecke zerlegt werden kann, wobei sich die Dreiecke nicht überschneiden und die Punkte des Polygons die Dreieckseckpunkte bilden. Jede Triangulierung eines einfachen Polygons mit n Ecken besteht aus $n - 2$ Dreiecken. Analog zur Triangulierung einer ebenen Punktmenge gilt eine beliebige Punktmenge Q als trianguliert, wenn die zugehörige konvexe Hülle $CH(Q)$ trianguliert ist, wobei die Punkte der Punktmenge Q die Ecken der disjunkten Dreiecke bilden. Die Triangulierung wird für zahlreiche Problemstellungen angewendet, unter anderem aus dem Bereich der Computergrafik oder auch der algorithmischen Geometrie:

- Visualisierung von 3D-Objekten,
- Approximation komplexer Geometrien,
- Netzgenerierung von Dreiecksnetzen für die Finite-Elemente-Methode (FEM),
- Punktlokalisationen,
- Schnittberechnungen,
- Kartografie und Geodäsie, etc.

Der in dieser Arbeit verwendete Algorithmus zur Triangulierung wurde in Anlehnung an den *Ear-Clipping-Algorithmus* nach EBERLY entwickelt. Dieser zeichnet sich durch die einfachere Implementierung gegenüber alternativen Triangulierungsalgorithmen aus. Dies wird jedoch mit einem etwas schlechteren Laufzeitverhalten $O(n^2)$ erkaufte. Weiterhin können unter Umständen sehr kleine Dreiecke entstehen, was insbesondere in der Computergrafik zu Problemen führen kann. Für die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen ist der Algorithmus jedoch völlig ausreichend. Ausgewogenere Polygonnetze können mit Hilfe der *Delaunay-Triangulation* oder dem *Voronoi-Diagramm* erstellt werden. Weiterführende Literatur hierzu findet sich in [DeB00]. Im Folgenden wird der modifizierte Ear-Clipping-Algorithmus kurz erläutert, da er in dieser Form zur Erzeugung der Querschnittsflächen des Schichtmodells verwendet wurde.

Als „Ohr“ (engl. *ear*) eines Polygons P wird ein Dreieck bezeichnet, das durch drei aufeinanderfolgende Eckpunkte p_{i-1}, p_i, p_{i+1} des Polygons aufgespannt wird, so dass kein Eckpunkt $p_j \in P$ in diesem Dreieck enthalten ist. Ein Polygon P mit n Eckpunkten ($n \geq 4$) enthält stets mindestens zwei nicht überlappende Ohren. Gelingt es ein Ohr zu identifizieren und zu entfernen, so erhält man ein Polygon mit $n - 1$ Eckpunkten. Die rekursive Anwendung dieses

Prinzip führt schrittweise zur Zerlegung des Polygons in $n - 2$ Ohren (Dreiecke) und somit zur gewünschten Triangulierung. Im Detail gestaltet sich der Ablauf wie folgt (vgl. Abb. 5-7):

- Auswahl eines Eckpunkts p_i und Erzeugung des zugehörigen Dreiecks T aus p_{i-1}, p_i, p_{i+1} (mit $p_n = p_0$ und $p_{-1} = p_{n-1}$)
- Überprüfung ob ein Eckpunkt $p_j \in P$ innerhalb von T liegt
- Entfernen des Punkts p_i aus der Punktliste von P , falls kein weiterer Punkt in T und rekursive Anwendung auf P
- Falls ein p_j in T existiert, Wiederholung mit p_{i+1}

Zur Beschleunigung des Algorithmus ist es ausreichend, wenn nur Eckpunkte p_i untersucht werden, bei denen die mit den Nachbarereckpunkten p_{i-1} und p_{i+1} gebildeten Kanten einen überstumpfen Winkel ($180^\circ < \alpha < 360^\circ$) innerhalb des Polygons bilden.

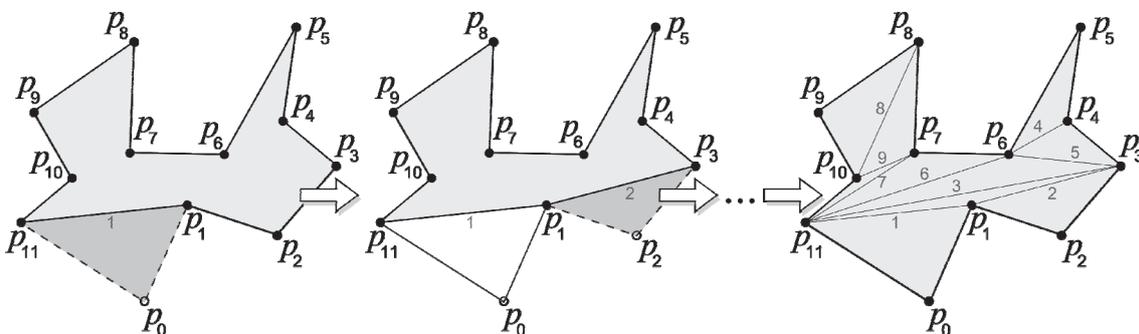


Abb. 5-7: Modifizierter Ear-Clipping-Algorithmus

Um den vorgestellten Algorithmus auch auf Polygone mit Löchern anwenden zu können, muss der Polygonzug „aufgeschnitten“ werden, so dass es sich wieder um ein geschlossenes lochfreies Polygon handelt. Hierzu müssen zwei gegenseitig sichtbare Eckpunkte gefunden werden, je einer aus dem äußeren und inneren Polygonzug. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieses Punktepaars beschreibt der folgende Ablauf (siehe auch Abb. 5-8):

- Suche eines Eckpunkts p_M im inneren Polygon P_I mit $p_{M,x} = \max\{p_{i,x}(P_I)\}$
- Ermittlung von Schnittpunkten zwischen einem Strahl $S = p_M + t \cdot (1,0)$ und allen gerichteten Kanten $e_i(p_i, p_{i+1})$ des äußeren Polygons P_O , für die p_M auf der linken Seite (im Inneren von P) liegt. Der am nächsten zu p_M auf S liegende Schnittpunkt ist p_K
- Falls $p_K \in P_O$, dann bilden p_M und p_K das gegenseitig sichtbare Punktepaar (Ende d. Algorithmus).
- Sonst ist p_K ein innerer Punkt der Kante e_K . Sei p_E der Endpunkt von e_K mit der größten x-Koordinate. Suche nach Eckpunkten p_j (P_O) mit überstumpfen Winkel der angrenzenden Kanten, wobei $p_j \neq p_E$ gilt. Falls diese Eckpunkte außerhalb des Dreiecks $\langle p_M, p_E, p_K \rangle$ liegen, bilden p_M und p_E das gegenseitig sichtbare Punktepaar (Ende d. Algorithmus)
- Suche nach einem Eckpunkt $p_R \in P_O$ mit überstumpfen Winkel der angrenzenden Kanten (mit $p_R \neq p_E$), der den Winkel α zwischen S und der Strecke $\langle p_M, p_R \rangle$ minimiert. Die Punkte p_M und p_R bilden das gegenseitig sichtbare Punktepaar (Ende d. Algorithmus). Bei Mehrfachlösungen Auswahl von p_R mit $p_R = \min\{\Delta(p_M, p_R)\}$

Der hier vorgestellte Ansatz zur Triangulierung von Polygonen mit Löchern kann durch die konsequente Anwendung auch für mehrfach verschachtelte Polygone verwendet werden,

sofern die Hierarchie äußerer und innerer Polygone eingehalten wird. Auf die hierarchische Zuordnung beliebig vieler Polygone wird im Abschnitt 7.3.5 weiter eingegangen.

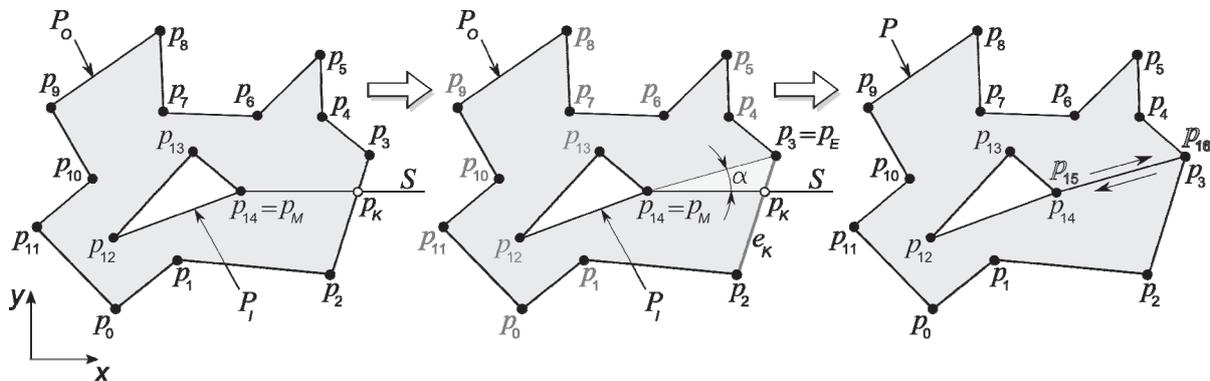


Abb. 5-8: Ear-Clipping bei Polygonen mit Löchern

5.1.2.7 Affine Transformation

Im Sinne der linearen Algebra stellt eine affine Transformation eine Vorschrift zur Abbildung zwischen zwei Vektorräumen dar. Dabei besitzt sie die Eigenschaften Geraden-, Parallelen- und Teilverhältnistreue. Geometrisch gesprochen handelt es sich bei der affinen Transformation um eine starre Bewegung eines Körpers. Da es sich bei der in dieser Arbeit zu optimierenden Bauteilorientierung um Drehungen eines Objekts im Raum handelt, werden hier die wesentlichen Werkzeuge der Vektorgeometrie für beliebige Rotationen kurz vorgestellt.

In der Regel beschreibt man Drehungen im euklidischen Raum mit Hilfe einer orthogonalen Rotationsmatrix $M_R \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Dabei ist zu unterscheiden, ob ein Objekt bezüglich eines festen Koordinatensystems oder das Koordinatensystem selbst gedreht wird. Die Matrix zur Beschreibung einer Rotation eines Objekts im \mathbb{R}^3 mit beliebigem Einheitsvektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T$ als Rotationsachse und Drehwinkel α besitzt folgende Form:

$$M_R = \begin{pmatrix} \cos \alpha + v_x^2 (1 - \cos \alpha) & v_x v_y (1 - \cos \alpha) - v_z \sin \alpha & v_x v_z (1 - \cos \alpha) + v_y \sin \alpha \\ v_y v_x (1 - \cos \alpha) + v_z \sin \alpha & \cos \alpha + v_y^2 (1 - \cos \alpha) & v_y v_z (1 - \cos \alpha) - v_x \sin \alpha \\ v_z v_x (1 - \cos \alpha) - v_y \sin \alpha & v_z v_y (1 - \cos \alpha) + v_x \sin \alpha & \cos \alpha + v_z^2 (1 - \cos \alpha) \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Solche beliebigen Drehungen lassen sich auch durch drei aufeinanderfolgende mit Euler-Winkeln beschriebene Drehungen darstellen. Hierzu existieren 12 verschiedene Konventionen, die sich in der Wahl der Rotationsachsen unterscheiden. Wesentlicher Nachteil ist jedoch, dass die Verkettung von Drehungen nicht anschaulich ist, da sich die Rotationsachsen mit dem Körpersystem verändern (vgl. Abb. 5-9, links). Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die auftretende Singularität bei Euler-Winkeln, d.h. eine einzige Rotation kann u. U. durch unterschiedliche Euler-Drehungen ausgedrückt werden (sog. *Gimbal Lock*).

Eine alternative und elegantere Möglichkeit zur Beschreibung einer Drehung stellt die Verwendung von Quaternionen dar. Hierbei handelt es sich formal um Elemente einer algebraischen Struktur, mit deren Hilfe sich beliebige Rotationen im Raum einfach berechnen lassen. Quaternionen erweitern das Konzept der komplexen Zahlen, indem die reellen Zahlen um einen dreidimensionalen Imaginärteil (Vektoranteil) ergänzt werden.

DEFINITION 5.8

Ein **Quaternion** $q \in \mathbb{H}$ ist als *Quadrupel (4-Tupel)* definiert, das sich aus einem Vektor \mathbf{v} bzw. seinen Komponenten x, y, z und einem Skalar zusammensetzt: $q = (w, x, y, z)^T = w + xi + yj + zk$ mit $w, x, y, z \in \mathbb{R}$ und $i, j, k \in \mathbb{C}$. Die Imaginärteile besitzen dabei folgende Eigenschaften (*Hamilton-Regeln*): $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$, $ij = -ji = k$, $jk = -kj = i$, $ki = -ik = j$. Für Quaternionen gilt demnach keine Kommutativität! **Reine Quaternionen** (\mathbb{H}_0) besitzen keinen Realteil. **Einheitsquaternionen** besitzen einen Betrag von 1.

Einheitsquaternionen eignen sich besonders zur Beschreibung räumlicher Drehungen. Hierzu bedient man sich der Polardarstellung. Diese kann analog zur Polarform komplexer Zahlen

$$z = |z| \cdot (\cos \phi + i \sin \phi) = |z| \cdot e^{i\phi} \quad (5.12)$$

hergeleitet werden. So beschreibt ein Einheitsquaternion q eine Drehung mit Drehwinkel 2α um eine durch das Einheitsquaternion $\mathbf{v} \in \mathbb{H}$ bzw. den Einheitsvektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T \in \mathbb{R}$ definierte Drehachse (vgl. Abb. 5-9, rechts):

$$q = \cos \alpha + \mathbf{v} \sin \alpha, \quad -\pi < \alpha < \pi, \quad \mathbf{v} = v_x i + v_y j + v_z k \quad (5.13)$$

Verwendet man die konjugierte Form eines Quaternionen

$$\bar{q} = w - xi - yj - zk = \cos \alpha - \mathbf{v} \sin \alpha, \quad (5.14)$$

so lässt sich eine beliebige Rotation eines Punktes $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ in folgender Form mit Hilfe des Quaternionen $q = xi + yj + zk$ als Repräsentation von \mathbf{p} abbilden:

$$\mathbf{p}' = q\mathbf{p}\bar{q} = \left(q_w^2 - |\mathbf{q}|^2 \right) \mathbf{p} + 2(\mathbf{q} \cdot \mathbf{v})\mathbf{q} + 2q_w(\mathbf{q} \times \mathbf{v}), \quad q\mathbf{p}\bar{q} \in \mathbb{H}_0 \quad (5.15)$$

Geometrisch kann man sich eine Drehung mit Quaternionen von \mathbf{p} nach \mathbf{p}' vorstellen, indem der Punkt \mathbf{p} auf der Verbindungsgerade zu \mathbf{p}' wandert. Dabei durchläuft er einen Punkt, der gerade den Abstand $\sin(\alpha)$ von der Drehachse und $\cos(\alpha)$ vom Ursprungspunkt \mathbf{p} besitzt (Abb. 5-9, rechts).

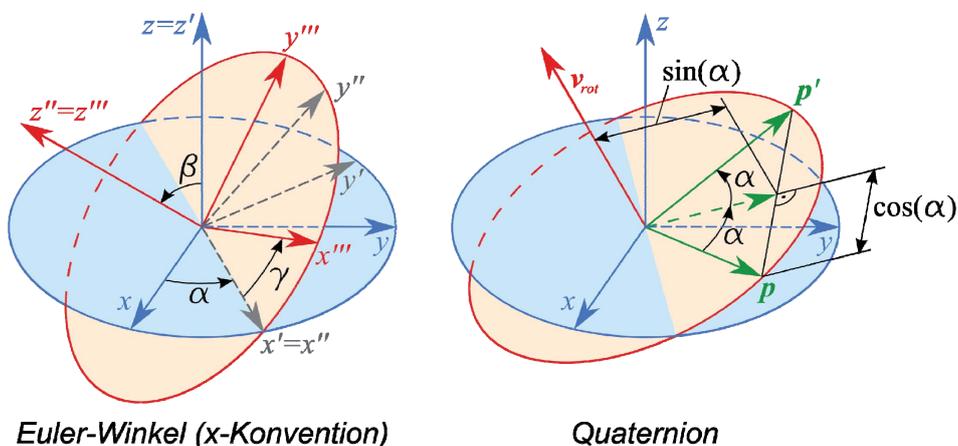


Abb. 5-9: Beschreibung einer Rotation (Euler-Winkel, Quaternion)

Die Hintereinanderausführung verschiedener Drehungen erfolgt durch Multiplikation von Quaternionen. Zu beachten sind hierbei jedoch die zahlreichen Berechnungsvorschriften. Quaternionen besitzen gegenüber Rotationsmatrizen folgende Vorteile, die insbesondere aufgrund der großen Anzahl durchzuführender Rotationen in dieser Arbeit zum Tragen kommen:

- Quaternionen speichern Rotationen platzsparend mit 4 Werten (Matrix: 9).
- Das Laufzeitverhalten bei verketteten Drehungen ist günstig. Multipliziert man Quaternionen, so ergeben sich 16 Multiplikationen (Matrix: 27). Quaternionen vermeiden die rechenintensive Auswertung trigonometrischer Funktionen, wie sie in Rotationsmatrizen enthalten sind.
- Eine Drehachse lässt sich durch einen Vektor anstelle einer Matrix beschreiben.
- Quaternionen sind anschaulicher als Rotationsmatrizen.

Da es sich bei Quaternionen um ein breites Feld der Mathematik mit zahlreichen Berechnungsvorschriften handelt, wird hier für die anzuwendende Arithmetik auf weiterführende Literatur verwiesen [MVM09].

5.1.3 Hüllkörper

Die Zeitkomplexität geometrischer Berechnungen mit einer Menge von Objekten (Punkte, Flächen, Kurven, ...) ergibt sich häufig durch die Komplexität der Objekte selbst. Mit steigender Anzahl an zu berücksichtigenden Objekten nimmt der Berechnungsaufwand in der Regel progressiv zu. Aus diesem Grund werden zur Beschleunigung von Algorithmen der Computergrafik und der algorithmischen Geometrie häufig Hüllkörper verwendet, die das betrachtete Objekt unter Berücksichtigung definierter Randbedingungen (z. B. Minimierung von Oberfläche, Volumen oder Maximalausdehnung) approximieren. Die Hüllobjekte werden auch unter dem Begriff *Bounding Volumes* zusammengefasst und stellen einen in der Regel geometrisch einfachen 3D-Körper dar, der ein oder mehrere komplexere Objekte umschließt. Typische Einsatzfelder solcher Körper sind z. B. das sogenannte *Ray Tracing* in der 3D-Computergrafik, also die Ermittlung der Sichtbarkeit dreidimensionaler Objekte von einem Punkt im Raum aus, sowie die Kollisionserkennung zur Berechnung von Durchdringungen. Im Folgenden werden die wichtigsten Hüllkörper, wovon einige auch in dieser Arbeit Anwendung finden, kurz vorgestellt, wobei die Objektmenge nicht näher charakterisiert wird. Im weiteren Verlauf der Arbeit beziehen sich jedoch weitere vorgestellte Algorithmen zur Hüllkörperberechnung ausschließlich auf Punktmengen.

- **Kugelhüllen** – Eine Kugelhülle (engl. *bounding sphere*) ist eine Objektmenge umfassende Kugel mit kleinstem Radius. In der Computergrafik häufig durchgeführte Schnitttests lassen sich mit dieser Art Objekthülle sehr einfach durchführen. Die einfache Berechnung wird jedoch in der Regel durch eine geringe Approximationsgüte erkauft. Demzufolge finden sphärische Hüllkörper ihren Einsatz häufig bei der Kollisionserkennung. Bessere Hülleigenschaften bei ähnlicher Gestalt bieten Ellipsoide.
- **Quaderhüllen** – Eine Quaderhülle (engl. *bounding box*) stellt einen minimal umfassenden Quader dar und umschreibt Objekte häufig genauer als Bounding Spheres. Aus diesem Grund werden diese deshalb vorwiegend im Bereich des Ray Tracing oder bei der dynamischen Simulation eingesetzt. Hier unterscheidet man zwischen beliebig orientier-

ten Quadern (engl. *oriented bounding box* – *OBB*) und achsenorientierten Quadern (engl. *axis aligned bounding box* – *AABB*). Die Berechnung einer achsenorientierten Bounding Box gestaltet sich wesentlich einfacher, als die einer beliebig orientierten Bounding Box. Dieser Vorteil wird jedoch dadurch erkauft, dass bei Rotation des Körpers die AABB neu berechnet werden muss und nicht die gleiche Transformationsgleichung, wie die des Körpers, angewendet werden kann. Eine Besonderheit bei der Berechnung einer beliebig orientierten Bounding Box einer Punktmenge ist, dass eine Seite bzw. Fläche der Box stets mit einer Kante bzw. Facette des Polyeders zusammenfällt. Algorithmen zur Berechnung finden sich in [Ebe00] und [Got00].

- **Zylinderhüllen** – Zylindrische Hüllkörper (engl. *bounding cylinder*) werden häufig verwendet, wenn das zu untersuchende Objekt lediglich Rotationen um und Translationen entlang der Zylinderachse zulässt.
- **Polytope** – Polytope als Hüllkörper (engl. *discrete oriented polytope* – *DOP*) stellen eine Verallgemeinerung einer achsenorientierten Bounding Box dar. Hierunter zählt auch die häufig verwendete konvexe Hülle (engl. *convex hull*).
- **Weitere Körper** – Neben den genannten Hüllkörpern finden weitere geometrische Primitive wie Ellipsoide, Kapseln u. Ä. zur Approximation von Punktmengen Anwendung.

5.1.4 Konvexe Hülle

Bei der Verarbeitung von großen Punktmenge, wie sie auch für die Teillösungen der vorliegenden Optimierungsaufgabe anfallen, interessieren oft die äußeren Grenzen der Punktmenge. Eine mathematische Methode, um solch eine äußere Grenze zu beschreiben, beruht auf einer geometrischen Eigenschaft, der *Konvexität*. Eine Teilmenge K aus \mathbb{R}^k (mit k als beliebige Dimension) wird als konvex bezeichnet, wenn sie zu je zwei Punkten p, q auch das Liniensegment pq enthält. Auf die dritte Dimension (\mathbb{R}^3) übertragen bedeutet dies, dass ein Polyeder als konvex zu bezeichnen ist, wenn die Verbindungsstrecke zweier beliebiger Punkte des Polyeders vollständig im Inneren oder auf den Seitenflächen liegt. Die mathematische Bezeichnung für die natürliche Grenze einer Punktmenge ist die in Abschnitt 5.1.1 vorgestellte konvexe Hülle. Die konvexe Hülle $CH(Q)$ einer Menge Q von Punkten ist als das kleinste konvexe Polyeder P definiert, für das jeder Punkt aus Q entweder auf einer Kante (\mathbb{R}^2) bzw. einer Fläche (\mathbb{R}^3) von P oder innerhalb von P liegt (siehe auch Abb. 5-10).

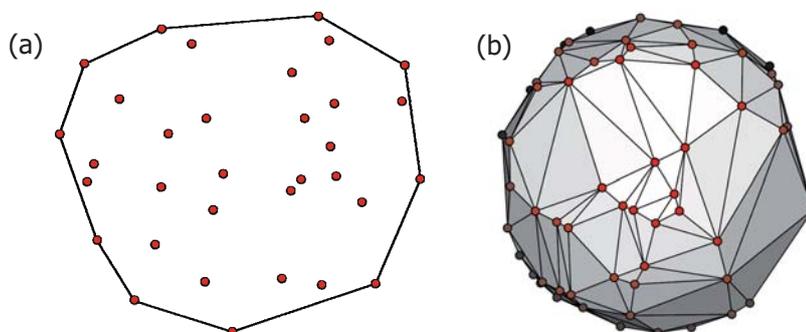


Abb. 5-10: Konvexe Hülle einer Punktmenge (a) im \mathbb{R}^2 und (b) im \mathbb{R}^3

Darüber hinaus muss für die konvexe Hülle im \mathbb{R}^3 folgende Gleichung erfüllt sein, die auch als Eulersche Formel oder auch Eulerscher Polyedersatz bezeichnet wird. Hierbei bezeichnet

v die Anzahl der Punkte (Vertices), e die Anzahl der Kanten (Edges) und f die Anzahl der Flächen (Faces) eines konvexen Polyeders:

$$v - e + f = 2 \quad (5.16)$$

Konvexe Hüllen werden neben Anwendungen zur Muster- oder Texterkennung, des Image-Processing oder auch der Lagerhaltung vorwiegend im Bereich der Computergrafik zur Objektapproximation (z. B. *Boundary Calculation*) oder auch für geometrische Optimierungsaufgaben verwendet. Diese speziellen Formen geometrischer Objekte kommen auch im weiteren Verlauf wiederholt zum Einsatz.

5.1.4.1 Algorithmen zur Berechnung

Der sogenannte *Graham-Scan* wurde 1972 von GRAHAM für 2-dimensionale Problemstellungen entwickelt [Gra72]. Der Algorithmus sortiert in einem ersten Schritt die Punktmenge im \mathbb{R}^2 , bildet anschließend ein umhüllendes (nicht zwangsläufig konvexes) Polygon und eliminiert nicht-konvexe Ecken, so dass dieses in ein konvexes Polygon überführt wird (siehe auch Abb. 5-11). Der vorgestellte Algorithmus wurde in dieser Arbeit zur Bestimmung der Projektionsfläche eines Polyeders verwendet (siehe Abschnitt 5.5.4). Der Ablauf gliedert sich wie folgt:

- Ermittlung des Punktes p_0 mit minimaler y-Koordinate (sowie x-Koordinate bei Mehrfachlösungen)
- Sortieren der Punkte nach fallendem Winkel α_i (Winkel zwischen der Verbindungsgerade p_0p_i und der x-Achse)
- Bei mehrfachem Auftreten eines Winkels (Kollinearität der Punkte) werden die Punkte eliminiert, zu denen ein Punkt mit größerem Abstand zu p_0 existiert
- Verbinden der übrigen Punkte zu einem Polygon
- Eliminierung nicht-konvexer Ecken

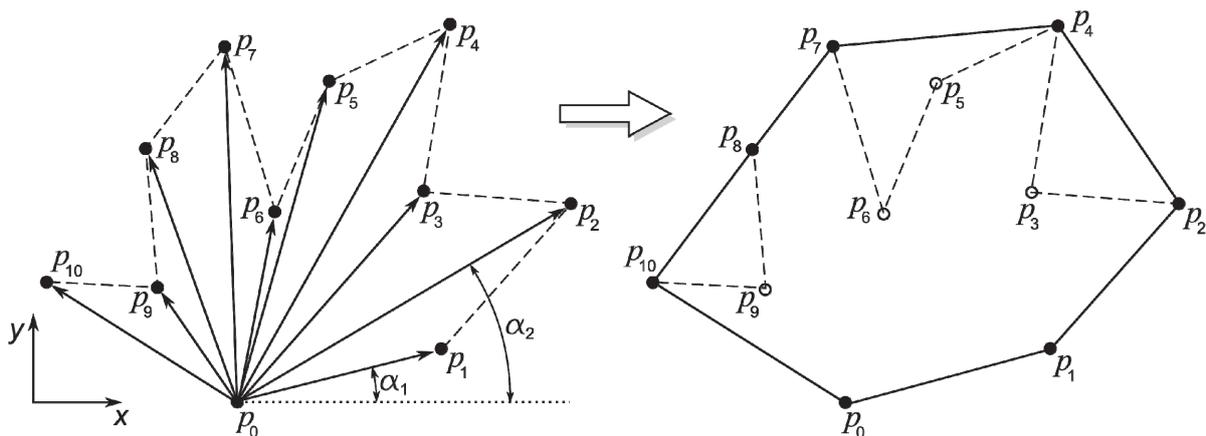


Abb. 5-11: Graham-Scan-Algorithmus

Bei diesem Algorithmus werden n Winkel in $O(n)$ betrachtet. Das Sortieren der Punkte nach fallendem Winkel ist bestmöglich in $\Omega(n \cdot \log n)$ durchzuführen [Knu98]. Anschließend erfolgt die Eliminierung nicht-konvexer Ecken in $O(n)$. Hieraus ergibt sich für den Graham-Scan-Algorithmus eine Gesamtlauzeit von $O(n \cdot \log n)$. Vergleichbare Algorithmen, jedoch mit un-

terschiedlichen Zeitkomplexitäten, sind der von CHAND und KAPUR entwickelte *Gift-Wrapping-Algorithmus* (oder auch *Package-Wrapping*) [ChKa70], der nach JARVIS [Jar73] bezeichnete *Jarvis' March* oder der von PREPARATA und HONG [PrHo77] entwickelte *Divide-and-Conquer-Algorithmus*. Letzterer verwendet das von BENTLEY und SHAMOS [BeSh76] eingeführte Prinzip „Teile-und-Herrsche“ (engl. *divide and conquer*) und ermittelt die konvexe Hülle durch Teilung des Problems in zwei kleinere Teilprobleme, welche unabhängig und rekursiv gelöst werden können. Die hier vorgestellten Algorithmen wurden für den \mathbb{R}^2 optimiert, so dass diese für 3D-Problemstellungen nicht oder nur schlecht angewendet werden können.

Der sogenannte *Quickhull-Algorithmus* eignet sich hervorragend für den \mathbb{R}^3 und macht sich den Umstand zunutze, dass Punkte innerhalb einer Umhüllenden nicht Bestandteil der konvexen Hülle sein können. In einem iterativen Vorgang werden innen liegende Punkte eliminiert und somit die Hülle ständig bis zur konvexen Hülle erweitert (vgl. Abb. 5-12). Im Detail gestaltet sich der Ablauf wie folgt:

- Falls eine Punktmenge Q nur ein Element enthält, bildet dieser Punkt die konvexe Hülle
- Ansonsten Bildung eines Ausgangs-Polytops P (Tetraeder) zwischen vier beliebigen Punkten p_0, p_1, p_2, p_3
- Ermittlung eines Punktes p_4 mit größter Distanz zu einer beliebig gewählten Facette $f_i(Q)$
- Löschen aller vom Punkt p_4 aus sichtbaren Facetten
- Ermittlung der *Horizont-Kanten* e_h der konvexen Hülle (Kanten zwischen sichtbaren und nicht sichtbaren Facetten)
- Für jede Horizont-Kante e_h Erzeugung einer Facette mit dem Punkt p_4
- Elimination aller innerhalb des Polytops liegenden Punkte
- Selektion einer neuen Facette $f_j(Q)$ und Wiederholung der vorherigen Schritte

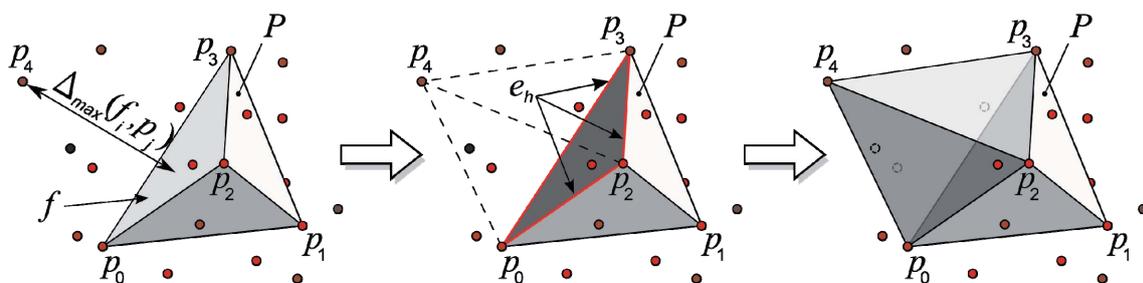


Abb. 5-12: Quickhull-Algorithmus (3D)

Dieser Algorithmus mit einer Zeitkomplexität von $O(n \cdot \log n)$ wurde bei der Umsetzung der vorliegenden Optimierungsaufgabe zur Berechnung der konvexen Hülle eines Polyeders verwendet (siehe Abschnitt 7.3.3). Neben den hier vorgestellten Algorithmen existieren weitere Ansätze, wie z. B. der *Incremental-Algorithmus* (auch besser bekannt als *Beneath-Beyond-Algorithmus*) [Ede87]. Algorithmen zur genaueren Berechnung konvexer Hüllen, jedoch mit deutlich höherem Implementierungsaufwand, werden in [BPF82] dargestellt.

5.1.4.2 Durchmesser

Zahlreiche Problemstellungen aus dem Bereich der algorithmischen Geometrie (Abstandsrechnung, Hüllgeometrie, Triangulierung u. v. a.) erfordern die Berechnung des *Durchmes-*

ers einer Punktmenge Q im \mathbb{R}^k . Hierunter versteht man den maximalen Abstand zwischen zwei Punkten p und q aus Q , wobei der Durchmesser der Punktmenge $d(Q)$ im Allgemeinen ungleich dem Durchmesser des Umkreises (\mathbb{R}^2) bzw. der Umkugel (\mathbb{R}^3) um Q ist.

$$d(Q) = \max\{\Delta(p, q) \mid p, q \in Q\} \quad (5.17)$$

Unter Beachtung der Eigenschaften von Hüllkörpern ergibt sich der Rückschluss, dass der Durchmesser einer beliebigen Punktmenge Q mit dem Durchmesser der konvexen Hülle $CH(Q)$ dieser Punktmenge identisch ist:

$$d(Q) = d(CH(Q)) \quad (5.18)$$

Zur Berechnung des Durchmessers wird die maximale Distanz antipodischer¹⁰ Punktepaare ermittelt. Diese Punkte liegen derart auf der konvexen Hülle, dass durch die Punkte verlaufende Stützgeraden bzw. Stützebenen an $CH(Q)$ parallel zueinander ausgerichtet sind. Erste Algorithmen für den \mathbb{R}^2 basieren auf den Arbeiten von SHAMOS [Sha78] und wurden von TOUSSAINT [Tou83] weiterentwickelt. Letzterer prägte für diese Vorgehensweise auch den Begriff *Rotating Calipers*. Diese Methode der „rotierenden Messschieber“ wurde in dieser Arbeit zur Ermittlung der maximal erreichbaren Bauhöhe eines Bauteils aufgegriffen und für den \mathbb{R}^3 erweitert, so dass bei $\Omega(n^2)$ antipodischen Punktepaaren der Durchmesser einer konvexen Hülle in $O(n^2)$ gefunden werden kann. Abb. 5-13 zeigt schematisch die Vorgehensweise zur Ermittlung des Durchmessers. Hierzu wird schrittweise eine Stützebene durch eine Facette f_i der konvexen Hülle $CH(Q)$ gebildet und der Abstand zu einem antipodischen Punkt p_j ermittelt, welcher durch eine iterative Suche in der Punktmenge Q gefunden wird.

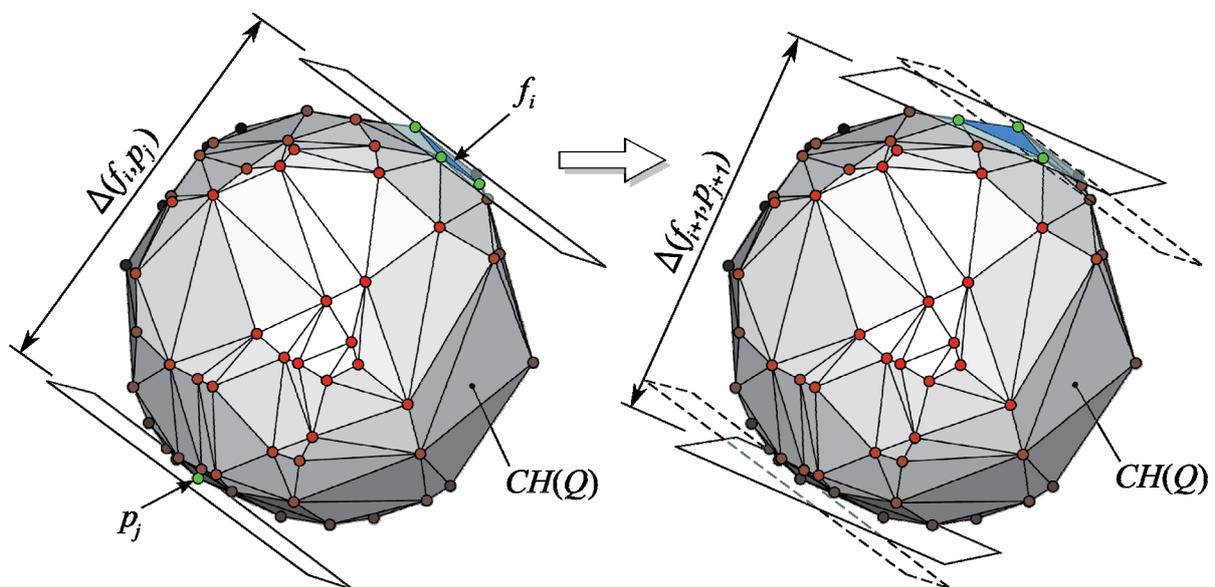


Abb. 5-13: Ermittlung des Durchmessers einer Punktmenge im \mathbb{R}^3

¹⁰ Antipode (griech. *anti podos*) = „Gegenfüßler“. Zwei Punkte eines Polyeders werden als antipodisch bezeichnet, wenn sie sich einander gegenüberliegend auf der konvexen Hülle befinden, so dass diese nicht durch parallel an den Punkten angelegte Stützgeraden bzw. Stützebenen durchdrungen wird.

5.1.5 Datenstrukturen für Polygonnetze

Die Auswahl einer geeigneten Datenstruktur zur Speicherung und Verarbeitung von Polygonnetzen, wie sie im STL-Format für Anwendungen der Rapid-Technologie verwendet werden, bedarf eines besonderen Augenmerks. Sie entscheidet über die Machbarkeit und Effizienz der eingesetzten Algorithmen zur Manipulation von Polygonnetzen.

5.1.5.1 Objektnetze

Um Objekte (z. B. Polygonnetze) algorithmisch erfassen zu können, können sogenannte Objektnetze verwendet werden. Diese entstehen durch Referenzierung eines Objekts mittels Referenzattributen auf andere Objekte, welche wiederum auf weitere Objekte referenzieren (siehe auch Abb. 5-14). Diese objektorientierte Darstellung ist für eine programmiertechnische Speicherung eines komplexen Polygonnetzes nur bedingt geeignet und muss um eine Listenstruktur erweitert werden.

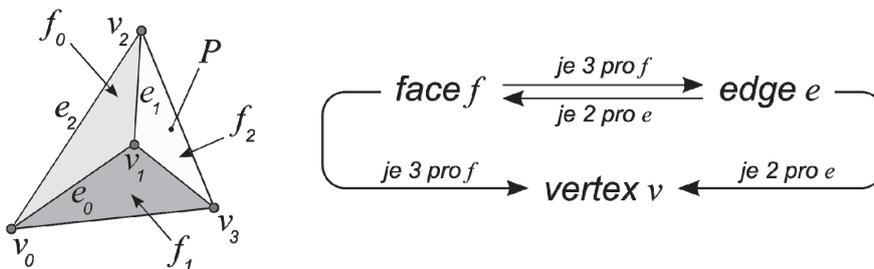


Abb. 5-14: Objektnetz eines Polygonnetzes

5.1.5.2 Listenstrukturen

Listenstrukturen haben sich in der algorithmischen Geometrie etabliert und sind mittlerweile unumgänglich bei der Berechnung von Objekten. Die exakte Definition einer Listenstruktur ist lediglich von zweitrangiger Bedeutung, solange damit Standardoperationen wie das Hinzufügen, Entfernen oder Löschen von Objekten möglich sind und die Pointer-Stabilität gewährleistet wird. Hierunter versteht man, dass bei der Durchführung von Standardoperationen die Speicheradressen anderer Objekte nicht beeinträchtigt werden. Zur algorithmischen Erfassung der in dieser Arbeit verwendeten Objekte (Punktmenge zur Repräsentation von Facettenmodellen) wurden solche Listenstrukturen verwendet. Da für viele algorithmische Operationen der umgesetzten Optimierungsaufgabe lediglich die Kenntnis der Facetten des Polyeders sowie ihrer Eckpunkte (Vertices) von Interesse ist, hat sich hier zunächst eine vereinfachte Listenstruktur als geeignet erwiesen. Diese besteht aus einer bereinigten Punkteliste (ohne Duplikate) und einer Flächenliste. Zur Trennung geometrischer und topologischer Informationen enthält die Punkteliste die Koordinaten der Punkte, während die Flächenliste lediglich Indizes der referenzierten Punkte enthält. Dies erleichtert Änderungen der Punkteigenschaften (z. B. Koordinaten, Attribute, etc.) und reduziert den Speicheraufwand. Einen Überblick über den Aufbau der verwendeten Listenstruktur für einfache Operationen an einem Polygonnetz liefert Abb. 5-15 anhand eines Beispiels an einem Tetraeder. Anstelle der Punkteliste könnte eine Kantenliste verwendet werden, in der die Anfangs- und Endpunkte der Kanten sowie die zwei zugehörigen Facetten gespeichert werden.

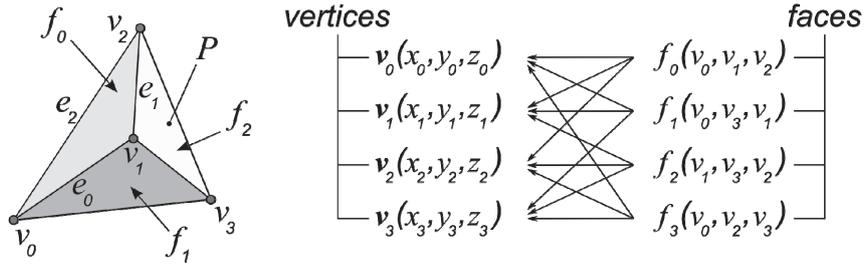


Abb. 5-15: Einfache Listenstruktur eines Polygonnetzes

Beide Listen-Varianten bieten Vor- und Nachteile (siehe Tab. 5-1) und sollten abhängig von den durchzuführenden Operationen am Polygonnetz eingesetzt werden. Somit können Suchoperationen untergeordneter Objekte (z. B. Kanten und Punkte einer Fläche) sehr effizient durchgeführt werden. Die Suche nach übergeordneten Objekten gestaltet sich jedoch sehr schwierig.

Tab. 5-1: Vor- und Nachteile einfacher Listenstrukturen

	Punktliste	Kantenliste
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Punkte redundanzfrei (keine Duplikate) ▪ schnelles Finden von Punkten ▪ Trennung von Geometrie und Topologie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ schnelle Kanten-Flächen-Zuordnung ▪ schnelles Finden von Kanten ▪ Trennung von Geometrie und Topologie
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Suche nach Kanten nur über Flächen möglich ▪ Suche nach zu Kanten angrenzenden Flächen sehr aufwändig („Stichprobensuche“) ▪ Suche nach zu Kanten/Punkten gehörenden Flächen sehr aufwändig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Suche nach Punkten nur über Kanten möglich ▪ Suche nach zu Punkten gehörende Flächen sehr aufwändig („Stichprobensuche“) ▪ Suche nach zu Kanten/Punkten gehörenden Flächen sehr aufwändig

Für komplexere Teilaufgaben der vorliegenden Optimierung, wie die Simulation des Vorgangs der Schichtzerlegung (Slicing), reichen diese einfachen Listenstrukturen nicht aus. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit für komplexere Operationen eine erweiterte Listenstruktur entwickelt, die alle topologischen Informationen über das betrachtete Polygonnetz sowie Attribute (z. B. Sichtbarkeit, Polygon-Zugehörigkeit, Abstand zur Schnittebene u. v. a. m.) ihrer Elemente enthält und die Suche nach Objektabhängigkeiten vereinfacht. Hierbei handelt es sich um ein Pointer-Netz, welches aus je einer Liste für Punkte, Kanten und Flächen aufgebaut ist (vgl. Abb. 5-16).

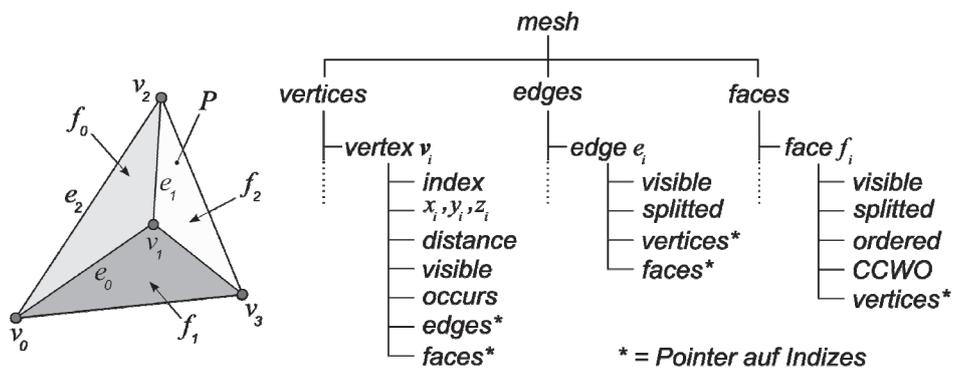


Abb. 5-16: Erweiterte Listenstruktur eines Polygonnetzes

Dabei zeigen Flächen und Kanten auf die zugehörigen Elemente der jeweiligen Punkte- bzw. Kanten-/Flächenlisten. Zusätzlich werden mit den Objekten Attribute gespeichert, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Diese werden später bei der Beschreibung der Konzeptumsetzung erläutert. Komplexere Datenstrukturen, wie die *Winged-Edge-Datenstruktur* nach BAUMGART oder die *Half-Edge-Datenstruktur* (doppelt verkettete Kantenliste), gestatten weiterführende Suchoperationen. Diese sind jedoch im vorliegenden Fall nicht notwendig, so dass die eingeführte erweiterte Listenstruktur für die durchzuführenden Manipulationen am Polygonnetz ausreichend ist.

5.2 Heterogene Objektrepräsentation

Neben der Möglichkeit Polygonnetze zu manipulieren (z. B. Transformation, Zerlegung, konvexe Hülle usw.) müssen Teilbereiche eines Netzes klassifizierbar sein. Dies dient der heterogenen Netz-Generierung und ermöglicht somit die Umsetzung der in Abschnitt 3.2 vorgestellten gradierten Eigenschaften von 3D-Modellen.

5.2.1 Segmentierung von Polygonnetzen

Um einen unüberschaubar großen Aufwand zur manuellen Zuweisung von Eigenschaften bzw. Attributen an einzelne Facetten oder Netzbereiche zu vermeiden, müssen Algorithmen entwickelt werden, die eine (nahezu) automatische Segmentierung des Polygonnetzes (engl. *mesh segmentation*) vornehmen. Hierauf aufbauend können anschließend einzelnen Netz-Segmenten gezielt Objekteigenschaften zugewiesen werden. Für den vorliegenden Fall ist dies z. B. die Kennzeichnung von Funktions- und Designflächen, die Zuweisung von Farb-, Textur- oder Materialinformationen oder auch die Identifikation von vor Supports zu schützenden Flächen. Des Weiteren lassen sich durch eine Segmentierung Mikro- und Mesostrukturen¹¹ definieren, die insbesondere für medizinische Anwendungen von Bedeutung sind. Insgesamt stellt die Segmentierung die Zerlegung eines Polygonnetzes in geometrisch oder semantisch zu unterscheidende Teilnetze (Cluster) dar. Ein Beispiel der geometrieorientierten Segmentierung liefert Abb. 5-17 anhand einer Neptun-Statue.

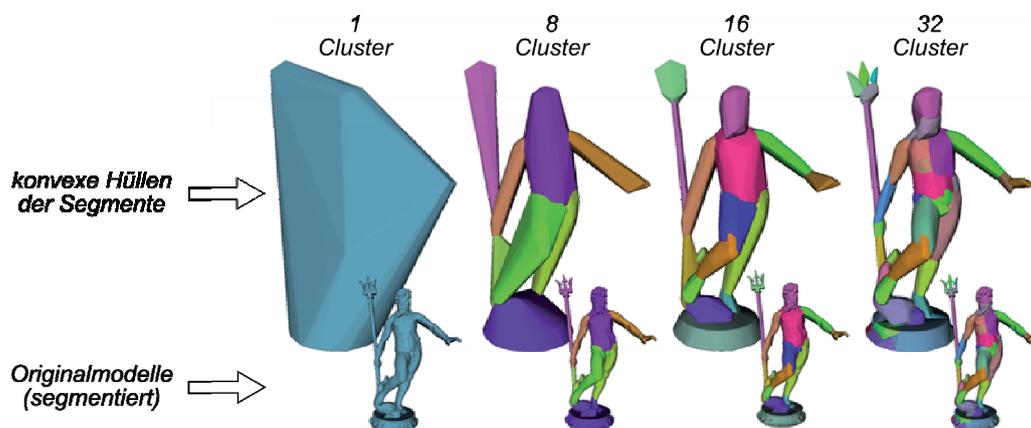


Abb. 5-17: Segmentierung polygonaler Netze und Segmentapproximation (Quelle: [Att08])

¹¹ Als Mesostruktur bezeichnet man eine feine, jedoch sichtbare Oberflächenstruktur (3D-Textur).

Neben dem vorrangigen Ziel der Netz-Zerlegung zur Klassifizierung von Facetten dient die Segmentierung ebenfalls zur Reduzierung des Berechnungsaufwands. So lassen sich konvexe Teilhüllen, also konvexe Hüllen von einzelnen Segmenten, erzeugen und sowohl für Netz-Manipulationen als auch für die Optimierung der Bauraumausnutzung verwenden.

5.2.2 Identifikation von Netzsegmenten

Die im Allgemeinen für eine Segmentierung beliebiger 3D-Objekte zugrunde gelegte Metrik basiert auf der Messung von Ähnlichkeiten, z. B. durch den Vergleich von Ortskoordinaten, Flächennormalen oder der Gaußschen Krümmung [Aga07]. Für Anwendungen der Bildverarbeitung und der optischen 3D-Messtechnik existieren darüber hinaus zahlreiche weitere verschiedene Metriken. Grundsätzlich lassen sich jedoch die verwendeten Methoden in direkte und indirekte einteilen. Direkte Methoden verwenden z. B. bei flächen- bzw. regionenbasierten Ansätzen die geodätischen Abstände benachbarter Facetten zur Steuerung des Cluster-Wachstums. Negative Krümmungen können dabei zur Definition von Segmentgrenzen herangezogen werden. Indirekte Methoden dagegen ermitteln konvexe Regionen, die typischerweise durch Kurven begrenzt werden, die ihrerseits in Bereichen mit negativer Krümmung liegen. Die Wahl des geeigneten Ansatzes ist letztendlich stark problemspezifisch und richtet sich nach dem Zweck der Segmentierung. Demgemäß resultiert die Vielzahl der unterschiedlichen Ansätze auf diesem Gebiet aus den verschiedenen Anforderungen und den damit verknüpften anzusetzenden Homogenitätskriterien. Technische Werkstücke lassen sich häufig durch geometrische Primitive, Regelgeometrien oder auch Quadriken¹² beschreiben. Ein gängiges Kriterium ist daher auch der innerhalb einer Toleranz liegende Fehler zwischen einem Approximations- bzw. Referenzobjekt, welches auch als *Proxy* bezeichnet wird, und dem Cluster. Eine genauere Annäherung erreicht man durch die Verwendung benutzerdefinierter Proxies.

Das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Konzept zur Definition und Identifikation heterogener Bauteileigenschaften basiert auf den Arbeiten von MANGAN & WHITAKER [MaWh99], die für die vorliegende Problemstellung angepasst und weiterentwickelt wurden. Ein wesentlicher Schritt zur Segmentierung stellt die Ermittlung geometrischer Wendepunkte dar. Hierzu wird die Gaußsche Krümmung an jedem Eckpunkt (Vertex) des Polygonnetzes ermittelt. Diese errechnet sich bei gekrümmten Flächen aus den beiden Hauptkrümmungen k_1, k_2 am betrachteten Punkt:

$$\kappa_{\text{Gauß}} = k_1 \cdot k_2 = \frac{1}{r_1} \cdot \frac{1}{r_2} \quad (5.19)$$

Im vorliegenden Fall handelt es sich jedoch um Polygonnetze, so dass die Krümmung durch eine alternative Vorgehensweise angenähert werden muss. Hierzu eignet sich der Winkel zwischen benachbarten Facetten, wobei diese Methode anfällig gegenüber Rauschen in der Höhenfunktion ist. Daher wird in dieser Arbeit die normierte Kovarianz¹³ der Normalenvektoren der an einem Vertex angrenzenden Facetten verwendet. Zu diesem Zweck werden zu-

¹² Bei einer Quadrik handelt es sich um eine implizite Fläche zweiter Ordnung (z. B. Ellipsoid, Kugel, Zylinder, Kegel, Hyperboloid, Paraboloid, etc.)

¹³ Die Kovarianz gibt als Maßzahl der Stochastik Aufschluss über den Zusammenhang zwischen zwei verschiedenen Größen. Dagegen stellt die Varianz ein Maß für die Abweichung einer Variable von ihrem Erwartungswert dar.

nächst die Varianzen und Kovarianzen der einzelnen Komponenten der n Normalenvektoren berechnet:

$$\text{Var}(uu) = \sigma_{uu}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (u_i - \bar{u})^2, \quad u \in \{x, y, z\} \quad (5.20)$$

$$\text{Cov}(uv) = \sigma_{uv}^2 = \sigma_{vu}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}), \quad u, v \in \{x, y, z\} \quad (5.21)$$

Eine Abschätzung κ für die Krümmung ergibt sich somit schließlich aus der normierten Kovarianzmatrix C :

$$\kappa = \|C\|, \quad C = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Mit diesem Maß zur Beschreibung der Krümmung zwischen verschiedenen Facetten des 3D-Netzes lassen sich die geometrischen Wendepunkte ermitteln. Zur Definition einer Höhenfunktion über die gesamte Domäne (3D-Netz) wandert ein Token¹⁴ ausgehend von einem beliebigen Vertex entlang des steilsten Abstiegs der Krümmungswerte benachbarter Eckpunkte gemäß dem sogenannten *Steepest-Descent-Verfahren* (siehe auch Abb. 5-18). Die Ortskoordinaten der Vertices sind dabei nicht relevant. Lediglich die Topologie des Polygonnetzes sowie die ermittelten Werte der Höhenfunktion sind von Interesse.

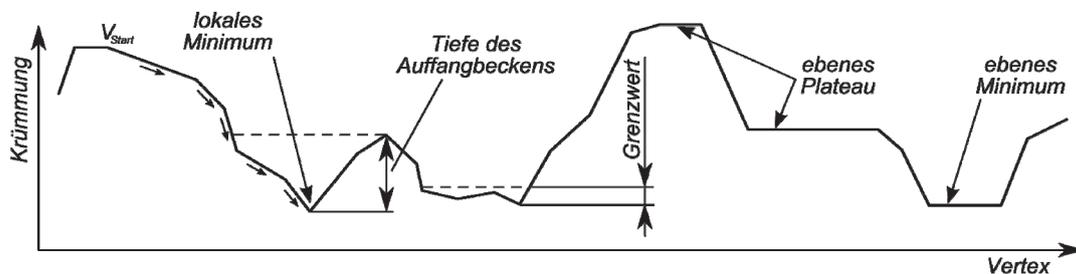


Abb. 5-18: Klassifizierung von Netzregionen anhand einer Höhenfunktion

Der Ablauf zur Segmentierung von 3D-Netzen gliedert sich wie folgt:

- Berechnung der Gaußschen Krümmung an jedem Vertex
- Ermittlung lokaler Minima (Abb. 5-18) durch Bildung einer Höhenfunktion nach dem *Steepest-Descent-Verfahren* und anschließende eindeutige Kennzeichnung
- Suche nach ebenen Flächen und Klassifizierung als ebenes Minimum oder „Plateau“ (Abb. 5-18)
- Iterative Cluster-Bildung ausgehend von den Plateaus hin zu bereits gekennzeichneten Regionen (lokales/ebenes Minimum, ebenes Plateau) über benachbarte Vertices

¹⁴ In diesem Zusammenhang stellt ein Token eine Vertex-Instanz dar, die positionsabhängig lokale Ausprägungen speichert.

- Zuordnung bisher nicht erfasster Vertices zu bereits gekennzeichneten Regionen nach dem *Steepest-Descent-Verfahren*
- Zusammenfassen von Regionen, dessen Tiefe des „Auffangbeckens“ (regionale Krümmungsdifferenz) unterhalb eines benutzerdefinierten Grenzwertes liegt

Ausgehend von Saat-Facetten werden also benachbarte Facetten mit einem regionenbasierten Ansatz zu einem Cluster zusammengefasst. Die Richtungssteuerung des Wachstums erfolgt dabei über den Vergleich der Krümmung zwischen benachbarten Facetten. Die entstehenden Cluster werden somit schrittweise vergrößert solange das Homogenitätskriterium der Krümmungs- bzw. Normalen-Ähnlichkeit erfüllt wird. Abhängig von der Objektgestalt ergeben sich hierdurch unterschiedlich viele Netzsegmente. Zur Steuerung der Segmentanzahl werden Cluster anhand eines Ähnlichkeitskriteriums zusammengefasst. Anschaulich lässt sich der Algorithmus mit der Suche nach Auffangbecken in einer 3D-Landschaft vergleichen. Platziert man einen Wassertropfen (Token) an einem Startpunkt (Vertex), so fließt der Tropfen entlang des steilsten Abstiegs (Gradientenabstieg) und wird in einem Auffangbecken, dem Wendepunkt der 3D-Landschaft, gesammelt. Dabei werden alle durchquerten Punkte (Vertices) einheitlich gekennzeichnet. Diese Vorgehensweise führt schließlich zur Zerlegung eines 3D-Netzes nach geometrischen Gesichtspunkten. Am Beispiel einer Kurbelwelle verdeutlicht Abb. 5-19 die Möglichkeit der Identifikation von Teilnetzen mit anschließender Farbkennzeichnung. Alternativ lassen sich die Teilnetze mit beliebigen Attributen versehen, die für die Optimierungsaufgabe von Interesse sind.

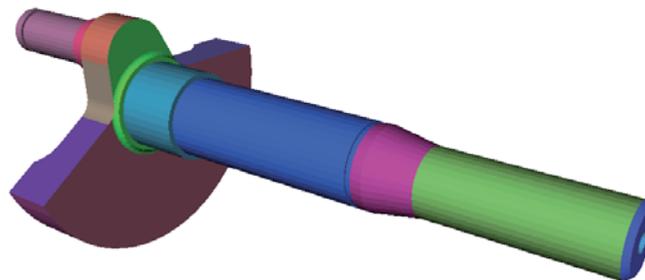


Abb. 5-19: Segmentierung einer Kurbelwelle

5.3 Minimierung des Treppenstufeneffekts

Den Haupteinflussfaktor der Oberflächenqualität eines generativ gefertigten Bauteils stellt der verfahrensbedingte Treppenstufeneffekt dar. Um eine optimale Qualität der Bauteiloberfläche zu erhalten, gilt es den Einfluss des Treppenstufeneffekts so gering wie möglich zu halten. Hierzu muss dieser Einfluss quantifiziert werden, um ihn anschließend im Rahmen eines Optimierungsvorgangs minimieren zu können. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Konzepte vorgestellt, die sich in ihrer Genauigkeit und, damit einhergehend, in ihrem Laufzeitverhalten unterscheiden.

5.3.1 Konzept des minimalen Volumenfehlers

Zur Ermittlung der schichtweisen Formabweichung zwischen Facetten- und Schichtmodell bietet sich die Berechnung der exakten Volumendifferenz bzw. des Volumenfehlers (engl.

volumetric error) an. Hierzu werden für jede Schicht die Volumina der beiden Modelle berechnet (Abb. 5-20).

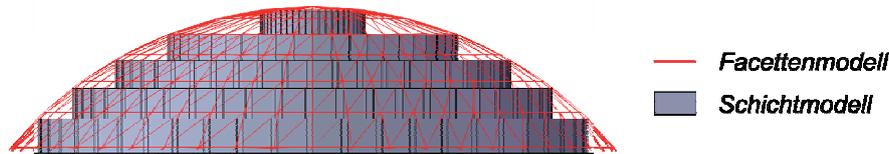


Abb. 5-20: Volumenfehler als Formabweichungsmaß

Das Volumen einer Schicht des Facettenmodells berechnet sich dabei unter Verwendung von Gleichung (5.7). Zur Ermittlung des Volumens einer Schicht des Schichtmodells wird das Produkt aus der Schichtdicke und dem Schichtquerschnitt, der mit Hilfe von Gleichung (5.5) berechnet werden kann, gebildet. Damit sich auftretende positive und negative Volumenabweichungen nicht gegenseitig auslöschen, ergibt sich die je Schicht i berechnete Volumenabweichung $V_{dev,i}$ aus dem Betrag der Differenz zwischen dem Facettenvolumen $V_{F,i}$ und dem Schichtvolumen $V_{L,i}$. Die Gesamtvolumenabweichung $V_{dev,tot}$ errechnet sich somit zu

$$V_{dev,tot} = \sum_{i=0}^{n-1} V_{dev,i} \quad , \quad V_{dev,i} = |V_{L,i} - V_{F,i}| \quad (5.23)$$

Damit auch ggf. einzelne extreme Abweichungen berücksichtigt werden und nicht durch die Aufsummierung der Einzelabweichungen auf alle Schichten verteilt werden, wird für das gesamte Bauteil für jede Orientierung die in einer Schicht maximal auftretende Volumenabweichung $V_{dev,max}$ ermittelt. Die zur Charakterisierung der Oberflächenqualität zu verwendende Kenngröße r_{Surf} ergibt sich schließlich unter der Berücksichtigung der Schichtanzahl n zu

$$r_{Surf} = \begin{cases} 1 - \frac{\bar{V}_{dev}}{V_{dev,max}} & |V_{dev,max} > 0 \\ 0 & |V_{dev,max} = 0 \end{cases} \quad , \quad \bar{V}_{dev} = \frac{V_{dev,tot}}{n} \quad , \quad V_{dev,max} \geq \bar{V}_{dev} \quad (5.24)$$

Da die maximal auftretende Abweichung $V_{dev,max}$ größer oder gleich der durchschnittlichen Abweichung sein muss, ergibt sich für die Kenngröße r_{Surf} stets ein Wert zwischen 0 und 1. Hierdurch lässt sich die Oberflächenqualität bei beliebigen Orientierungen auch ohne Referenzwert bewerten. Ein entscheidender Nachteil dieses Konzepts ist der hohe Berechnungsaufwand, der insbesondere bei komplexen Bauteilen während der im Zuge des Optimierungsprozesses notwendigen Iterationsschritte zum Tragen kommt. Daher eignet sich dieses Verfahren eher für flache Bauteile oder für Bauteile mit geringerer Komplexität. Mit zukünftig zunehmender Rechenleistung erfüllt dieses Konzept jedoch die steigenden Anforderungen hinsichtlich der notwendigen Genauigkeit.

5.3.2 Konzept der minimalen Spitzenhöhe

Eine deutlich performantere Vorgehensweise zur Abschätzung und Bewertung der Formabweichung stellt das hier vorgestellte Konzept dar. Durch die deutliche Steigerung der Be-

rechnungsgeschwindigkeit eignet sich dieses Konzept besonders für komplexe Bauteile bzw. für Modelle mit einer hohen Facettenanzahl. Bei diesem approximierenden Ansatz wird die von DOLENC und MÄKELÄ [DoMa94] eingeführte Spitzenhöhe (engl. *cusp height*) als Fehlermaß für die Formabweichung und somit als Gütekriterium für die Oberflächenqualität verwendet. Die Spitzenhöhe ist in einem gedachten Fehlerdreieck zwischen Facetten- und Schichtmodell als größte Abweichung an einer betrachteten Facette anzusehen (Abb. 5-21).

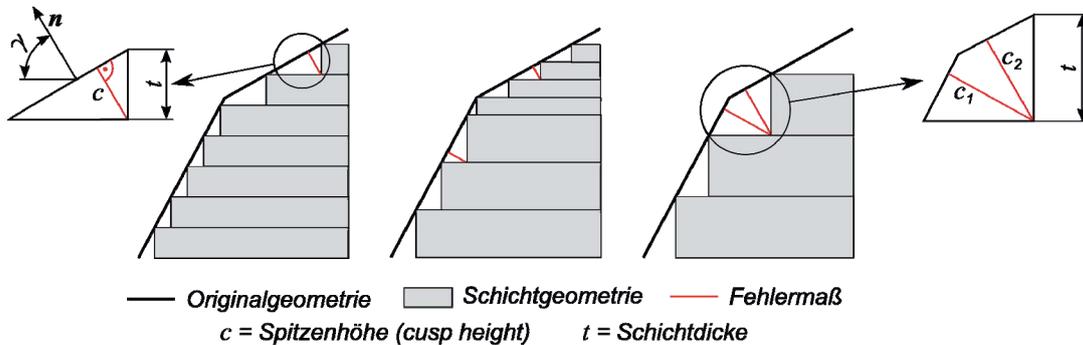


Abb. 5-21: Ermittlung des Fehlerdreiecks zur Bestimmung der Spitzenhöhe

Die Spitzenhöhe c berechnet sich gemäß Abb. 5-21 aus der Schichtdicke t und dem Neigungswinkel γ der Facette gegenüber der Vertikalen ($\hat{=}$ Baurichtung):

$$c = t \cdot \sin \gamma \quad (5.25)$$

Betrachtet man den Einheitsnormalenvektor \mathbf{n} einer Facette, so gilt weiterhin

$$\sin \gamma = \frac{n_z}{|\mathbf{n}|}, \quad \mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z). \quad (5.26)$$

Mit einem zuvor festgelegten benutzerdefinierten Maximalwert für die zulässige Formabweichung c_{\max} muss der Spitzenvektor \mathbf{c} die folgende Ungleichung erfüllen:

$$|\mathbf{c}| = c \leq c_{\max} < t, \quad \mathbf{c} = c\mathbf{n} \quad (5.27)$$

Die Gleichungen (5.25) - (5.27) werden somit zur Quantifizierung und Bewertung des Stufenfehlers bei einer uniformen Schichtzerlegung herangezogen. Verwendet man alternativ eine adaptive Schichtzerlegung, so muss die Schichtdicke angepasst werden, damit Gleichung (5.27) erfüllt wird. Hierdurch ergibt sich für die lokal optimierte Schichtdicke:

$$t_{\text{local}} = \frac{c_{\max}}{n_z}, \quad n_z \neq 0 \quad (5.28)$$

Unter Berücksichtigung der fertigungsbedingten Extremwerte der Schichtdicke t_{\min} bzw. t_{\max} berechnet sich der für eine Schicht ermittelte Optimalwert t_{opt} dann zu

$$t_{\text{opt}} = \min\{t_{\max}, \min\{t_{\text{local}}\}\}, \quad t_{\text{opt}} \geq t_{\min}. \quad (5.29)$$

Ausschlaggebend für die Effektivität des adaptiven Konzepts ist dabei lediglich die Vorgehensweise der Iteration gemäß Abschnitt 4.4.2. Die Basis zur Ermittlung der optimierten Schichtdicken bilden jedoch stets die Gleichungen (5.28) und (5.29). Berücksichtigt man zudem eine gegebenenfalls vorhandene Kennzeichnung von Facetten gemäß Abschnitt 5.2, so kann für ausgewählte Bereiche, die als Design- oder Funktionsfläche gekennzeichnet wurden, ein gesonderter Grenzwert für die zulässige Abweichung bzw. für die Spitzenhöhe (c_{\max}) definiert werden.

Zur Bewertung der infolge des Treppenstufeneffekts beeinträchtigten Oberflächenqualität eines Bauteils wird in jeder Schicht für jede Facette Ungleichung (5.27) auf Gültigkeit überprüft. Da in der Regel in einer beliebigen Orientierung innerhalb einer Schicht für jede Facette unterschiedliche Spitzenhöhen ermittelt werden, wird unter Einbeziehung der Facettenanzahl f schichtweise die mittlere Spitzenhöhe \bar{c}_L berechnet:

$$\bar{c}_L = \frac{1}{f} \sum_{i=0}^{f-1} c_i \quad (5.30)$$

Gemäß Abb. 5-21 kann die auftretende Spitzenhöhe c maximal gleich der Schichtdicke t sein. Berücksichtigt man zur Beurteilung der Oberflächenqualität zudem noch die im Bauteil maximal auftretende Spitzenhöhe $c_{occ,max}$, so errechnet sich unter Angabe der Schichtanzahl n die Kenngröße r_{Surf} zu:

$$r_{Surf} = \frac{\bar{c} + (c_{occ,max} - \bar{c})^2}{t}, \quad \bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \bar{c}_{L,i}, \quad c_{occ,max} \geq \bar{c} \quad (5.31)$$

Eine Schwäche dieses Ansatzes zur Quantifizierung des Treppenstufeneffekts tritt auf, wenn innerhalb einer Schicht ein Fehlerdreieck nicht eindeutig beschreibbar ist. Dies ist z. B. der Fall, wenn sich die Neigung an einem Punkt innerhalb der Schicht ändert. Somit müssten ggf. mehrere Fehlerdreiecke bzw. Spitzenhöhen ermittelt werden (vgl. Abb. 5-21, rechts).

Berücksichtigt man die Ausrichtung des Normalenvektors (n_z positiv oder negativ), so lassen sich unterschiedliche Grenzwerte der Formabweichung für Bauteilbereiche mit verschiedenen Inklusionseigenschaften der Schichtstruktur definieren. Bereiche, die durch die Schichtzerlegung von der Schichtstruktur eingeschlossen werden (Materialüberschuss), erhalten so einen positiven Grenzwert c_{pos} und Bereiche, die außerhalb der Schichtstruktur liegen (Materialdefizit), einen negativen Grenzwert c_{neg} (vgl. Abb. 5-22).

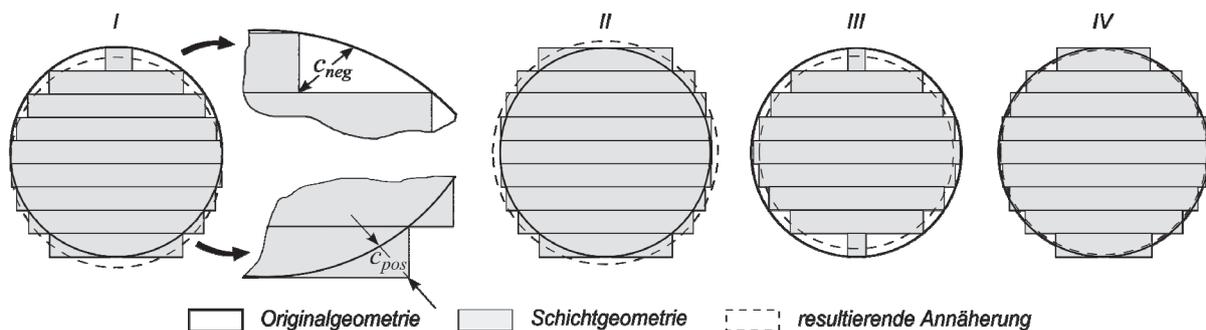


Abb. 5-22: Inklusionsbeziehungen zwischen Original- und Schichtmodell

Eine konventionelle Inklusionsbeziehung zwischen der abzubildenden Geometrie und der Schichtstruktur kann häufig zu Verzerrungen in der resultierenden Geometrie führen (Fall I). Alternative Inklusionsbeziehungen erlauben dagegen eine Material abtragende (Fall II) oder auch Material hinzufügende (Fall III) Nachbearbeitung unter Gewährleistung der Formentreue durch gezielte Fertigung mit Über- bzw. Untermaß [LiCh01]. Durch ein geeignetes Schichtzerlegungskonzept lässt sich eine Inklusionseigenschaft definieren, die die Formabweichung auf ein Minimum reduziert (Fall IV). Da jede von Fall I abweichende Inklusionsbeziehung zu Schichtzerlegungsverfahren führt, die bisher nicht auf kommerziellen Anlagen implementiert wurden, ist die Berücksichtigung alternativer Inklusionseigenschaften nicht Bestandteil dieser Arbeit.

5.4 Minimierung des Verzugs

Neben dem gewählten Schichtzerlegungsverfahren tragen Schrumpfvorgänge sowie auftretender Verzug entscheidend zur Maßhaltigkeit eines Bauteils bei. Wie in Abschnitt 3.2 angedeutet, fehlen in der Praxis bis dato entscheidende Kenntnisse über die genauen Vorgänge und Wechselwirkungen zur qualifizierten Vorhersage des zu erwartenden Verzugs. Daher wird in dieser Arbeit eine Kenngröße zur Beurteilung einer möglichen Verformung lediglich auf Basis eines potenziell hohen Energieeintrags bzw. potenzieller Temperaturgradienten anhand geometrischer Zusammenhänge zwischen den Schichtquerschnitten entwickelt. Weitere Einflüsse, die zu einem eintretenden Verzug beitragen können, wie der gesamte Wärmehaushalt des Bauraums, Leitfähigkeit des Ausgangsmaterials, Lasereindringtiefe, etc., sind nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Zur Herleitung einer geeigneten Kenngröße sind zunächst die zu betrachtenden Effekte zu quantifizieren. So sind bei der Wahl der Bauteilorientierung große Belichtungsflächen zu vermeiden [DaKö09]. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit verschiedener Orientierungen wird eine kritische Belichtungsfläche A_{crit} als Bruchteil der Plattformfläche A_P eingeführt. Die auf Erfahrungswerten basierende Verhältniszahl η ist für jede Anlage zu definieren. Berechnet man für jede Schicht den Flächenquerschnitt A_L gemäß Gleichung (5.5), die im Bauteil maximal auftretende Fläche $A_{L,max}$ sowie die über alle Schichten n gemittelte Querschnittsfläche \bar{A}_L , so ergibt sich für einen eingeführten Belichtungsfaktor f_{Exp} :

$$f_{Exp} = \frac{\sqrt{\bar{A}_L^2 + (A_{L,max} - \bar{A}_L)^2}}{A_{crit}}, \quad A_{crit} = \eta \cdot A_P, \quad \eta \in \{0 \dots 1\} \quad (5.32)$$

Einen weiteren Einflussfaktor auf die Maßhaltigkeit eines Bauteils stellen große Differenzen aufeinanderfolgender Querschnittsflächen dar. Hierzu wird das Flächenverhältnis ν adjazenter Schichten definiert:

$$\nu_i = \frac{A_{L,i+1}}{A_{L,i}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-2 \quad (5.33)$$

Zur Bewertung potenzieller Temperaturgradienten wird schließlich ein Faktor f_{TG} eingeführt, der unter Berücksichtigung eines auf Basis von Erfahrungswerten zu definierenden kritischen

Flächenverhältnisses v_{crit} große Sprünge aufeinanderfolgender Querschnitte erfasst. Der Gütefaktor f_{TG} berechnet sich aus:

$$f_{TG} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} f_{TG,i} \quad , \quad f_{TG,i} = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\frac{v_i}{v_{crit}} \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{2} & |v_i| < 2v_{crit} \\ 1 & |v_i| \geq 2v_{crit} \end{cases} \quad , \quad v_{crit} \in \{2 \dots 6\} \quad (5.34)$$

Insgesamt tragen die beiden Einflussfaktoren zur Bildung einer Verzugs-Kenngröße r_{Dis} bei. Zur gezielten Berücksichtigung bildet sich die Kenngröße aus der Summe der gewichteten Faktoren f_{Exp} und f_{TG} :

$$r_{Dis} = w_{Exp} \cdot f_{Exp} + w_{TG} \cdot f_{TG} \quad , \quad w_{Exp}, w_{TG} \in \{0 \dots 1\} \quad , \quad w_{Exp} + w_{TG} = 1 \quad (5.35)$$

Trotz bis dato fehlender Verfügbarkeit einer umfassenden empirischen Wissensbasis zur genauen Charakterisierung der zum Verzug führenden Effekte, liefert dieser Ansatz erste Hinweise auf potenzielle Verluste der Maßhaltigkeit.

5.5 Optimierung der Stützkonstruktionen

An einem Bauteil angreifende Stützkonstruktionen führen in der Regel zu einer Beeinträchtigung der Oberflächenqualität, steigenden Baukosten aufgrund des verbrauchten Stützmaterials und erfordern eine Nachbearbeitung zur Entfernung der Supports sowie zur Wiederherstellung der geforderten Oberflächengüte. Daher werden diesbezüglich in den folgenden Abschnitten Ansätze zur Kennwertermittlung vorgestellt.

5.5.1 Kontaktfläche

Bei generativen Verfahren, die den Einsatz von Stützkonstruktionen erfordern, gestaltet sich die Support-Generierung als komplexer Vorgang, der zumeist erfahrungsbasiert vonstatten geht und sich unter den Anlagenherstellern bzw. Softwareanbietern konzeptionell unterscheidet. In dieser Arbeit wird aufgrund der fehlenden einheitlichen Wissensbasis die Annahme getroffen, dass jede Facette, die einen Grenzwinkel γ_{sup} zur Horizontalen unterschreitet (ca. 42 – 45°), gestützt werden muss. Zur Ermittlung der Facettenneigung wird der Winkel γ zwischen dem Baurichtungsvektor \mathbf{d} und dem Normalenvektor \mathbf{n} der Facette ermittelt:

$$\cos \gamma = \frac{\mathbf{d} \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{d}| \cdot |\mathbf{n}|} \quad (5.36)$$

Bei der Vielzahl unterschiedlicher Support-Typen und der daraus resultierenden Kombinationsvielfalt, werden hier vereinfacht Blocksupports bzw. Volumensupports verwendet. Zur Ermittlung der Kontaktfläche wird für jede Facette f der Flächeninhalt A_F mit Hilfe von Gleichung (5.1) berechnet. Verwendet man anstelle der das Dreieck aufspannenden Vektoren \mathbf{a} ,

\mathbf{b} die Ortsvektoren der Eckpunkte $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$, so folgt unter Berücksichtigung der „Rechte-Hand-Regel“ nach Abschnitt 5.1.2.1 für die Kontaktfläche $A_{down,tot}$:

$$A_{down,tot} = \sum_{i=0}^{f-1} A_{F,i}, \quad A_{F,i} = \begin{cases} \frac{1}{2} |(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_0) \times (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_0)| & |\gamma| > \gamma_{sup} \\ 0 & |\gamma| < \gamma_{sup} \end{cases}, \quad 135^\circ \leq \gamma_{sup} \leq 138^\circ \quad (5.37)$$

Neben den nach unten weisenden Facetten (engl. *downward facets*) müssen jedoch ebenfalls diejenigen nach oben weisenden Facetten (engl. *upward facets*) berücksichtigt werden, bei denen Supports von oben angreifen (vgl. Abb. 5-23).

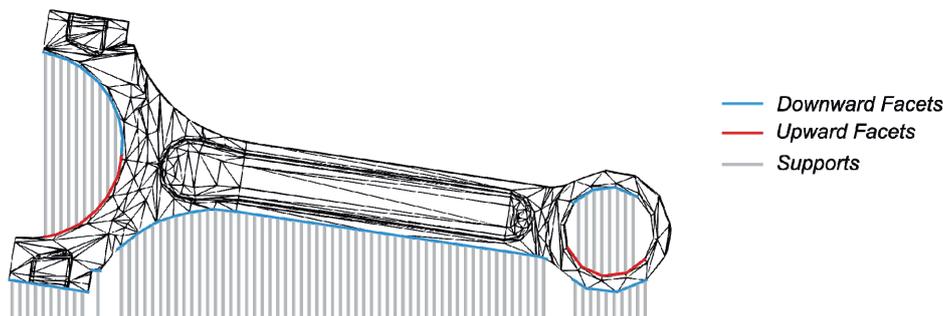


Abb. 5-23: Support-Kontaktstellen an einer Pleuelstange

Hierzu ist die projizierte Fläche der Downward Facets auf die Upward Facets zu berechnen. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung wird in einem ersten Schritt für jede Facette f_{down} die Fläche A_{down} auf jede betroffene Facette f_{up} projiziert, indem man jeden Vertex von f_{down} auf die Ebene abbildet, die durch die Eckpunkte von f_{up} aufgespannt wird (siehe Abb. 5-24).

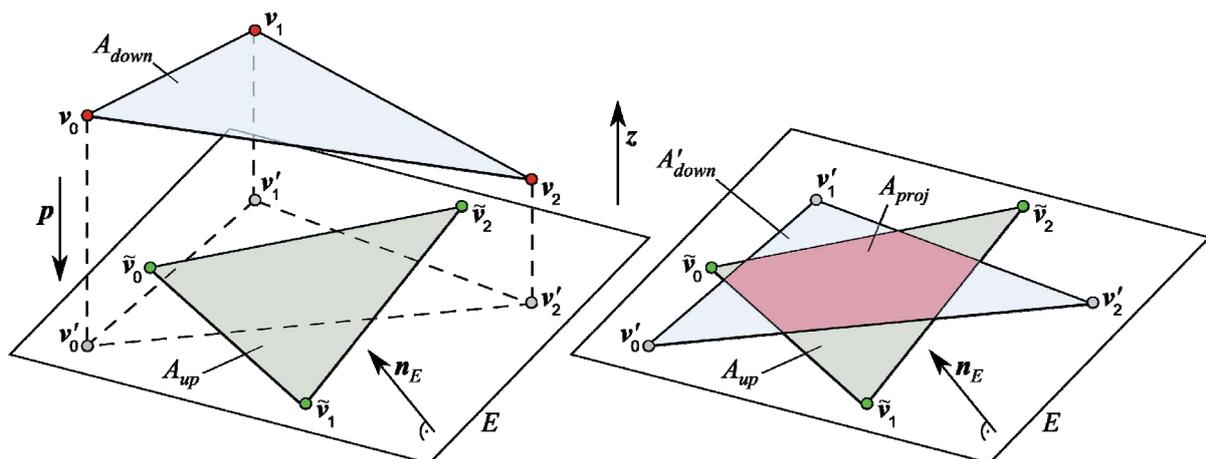


Abb. 5-24: Parallelprojektion von Facetten zur Ermittlung von Kontaktflächen

Führt man einen Projektionsvektor \mathbf{p} ein, so berechnet sich die allgemeine Abbildung \mathbf{v}' eines Punktes \mathbf{v} zu:

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} + t \cdot \mathbf{p}, \quad -\infty \leq t \leq \infty, \quad \mathbf{p} = -\mathbf{z} \quad (5.38)$$

Setzt man Gleichung (5.38) mit \mathbf{n}_E als Normalenvektor der Ebene E in die implizite Darstellung einer Ebenengleichung ein, so erhält man für den Parameter t :

$$t = \frac{-(\mathbf{n}_E \mathbf{v} + d)}{\mathbf{n}_E \mathbf{p}}, \quad d = \frac{|\mathbf{n}_E(\mathbf{q} - \tilde{\mathbf{v}})|}{|\mathbf{n}_E|}, \quad \mathbf{q} = (0,0,0) \quad (5.39)$$

Hierbei bezeichnet $\tilde{\mathbf{v}}$ einen Eckpunkt von f_{up} . Durch Umformung sowie Einführung von homogenen Koordinaten und der 4x4-Identitätsmatrix I_4 lässt sich schließlich eine Projektionsmatrix M definieren, die einen beliebigen Punkt \mathbf{v} auf eine beliebige Ebene E zu \mathbf{v}' abbildet:

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v}^T M, \quad M = \mathbf{n}_E \mathbf{p}^T - (\mathbf{n}_E \mathbf{p}) I_4 \quad (5.40)$$

Mit Hilfe der projizierten Fläche A'_{down} und der bekannten Fläche A_{up} lässt sich schließlich durch Berechnung der Schnittmenge die gesuchte Fläche A_{proj} ermitteln (vgl. Abb. 5-24). Die Lösung dieser Aufgabe beruht auf der Anwendung Boolescher Operationen auf Polygone (hier: Dreiecke). Unter Berücksichtigung des Umlaufsinnns der zu einem Dreieck zugehörigen Eckpunkte und der damit verknüpften Definition der Innen- und Außenseite des Dreiecks, lässt sich der Durchschnitt von zwei Dreiecken T_1, T_2 berechnen, indem für jede Kante von T_1 bzw. T_2 ein Schnittpunkt mit jeder Kante von T_2 bzw. T_1 ermittelt wird (siehe Abb. 5-25). Resultierende Schnittpunkte sind Teil des Schnittpolygons. Zur Erfassung der Polygonkanten wird für jeden Schnittpunkt mit Hilfe des Halbebenentest nach Gleichung (5.4) das zu berücksichtigende Kantensegment ermittelt.

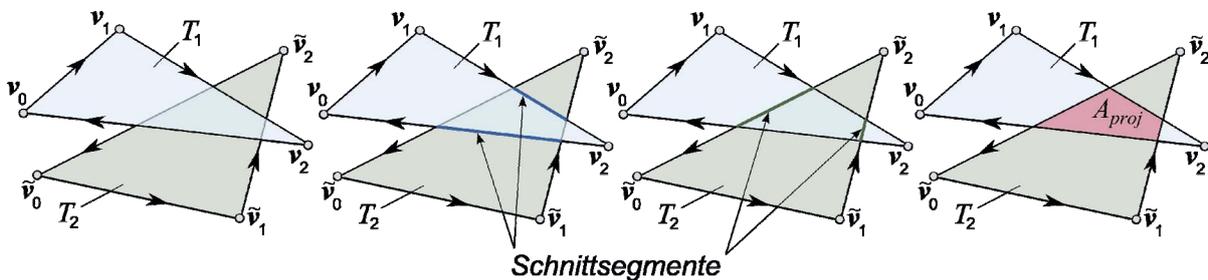


Abb. 5-25: Berechnung des Durchschnitts von zwei Dreiecken

Die gesamte Kontaktfläche A_{SC} zwischen Bauteil und angrenzenden Stützkonstruktionen ergibt sich somit schließlich zu:

$$A_{SC} = A_{down,tot} + A_{proj,tot}, \quad A_{proj,tot} = \sum_{i=0}^{g-1} A_{proj,g}, \quad 0 \leq g < f \quad (5.41)$$

Die Kenngröße r_{SuppA} ergibt sich somit aus dem Quotienten aus der Kontaktfläche A_{SC} und der Gesamtoberfläche A_P des Polyeders P :

$$r_{SuppA} = \frac{A_{SC}}{A_P} \quad (5.42)$$

Die Berechnung der Kontaktfläche erfordert einen hohen Berechnungsaufwand, liefert aber genaue Ergebnisse zur Abschätzung des Aufwands für die Nachbearbeitung und gibt Auf-

schluss über die Kontaktstellen, die für die Ermittlung der Entfernbareit von Supports benötigt werden (Abschnitt 5.5.3). Darüber hinaus lassen sich mit Hilfe der nach Abschnitt 5.2 beschriebenen Methode zur Kennzeichnung von Facetten auch Oberflächenbereiche vor angreifenden Stützkonstruktionen schützen. Methoden zur heuristischen Abschätzung der Kontaktfläche zwischen Bauteil und Supports im Sinne der Performance-Steigerung finden sich in [SJCS99].

5.5.2 Volumen

Je nach eingestellter Orientierung des Bauteils können sich unterschiedliche Stützkonstruktionen ergeben, die sich unter anderem in ihrem Volumen und somit in ihrem Materialaufwand unterscheiden. Zur Berechnung des Stützvolumens können die in Abschnitt 5.5.1 ermittelten Kontaktflächen herangezogen werden. Auf diese Weise lassen sich mit Hilfe der von Supports betroffenen Flächen f_{down} und f_{up} stets dreieckige Prismen mit einem Volumen V_{Pri} definieren, die wiederum in 3 Tetraeder zerlegt werden können. Die Volumina V_T der Tetraeder lassen sich mit Gleichung (5.7) ermitteln. Das Volumen V_{S1} der Supports von Bauteil zu Bauteil ergibt sich somit zu:

$$V_{S1} = \sum_{i=0}^k V_{Pri,i} \quad , \quad V_{Pri} = \sum_{i=1}^3 V_{T,i} \quad (5.43)$$

Bei Supports, die eine direkte Anbindung zur Bauplattform besitzen, kann zur Ermittlung des Prismas die Facette f_{down} direkt auf die Bauplattform projiziert werden. Das Volumen V_{S2} der Supports von Bauteil zur Plattform lässt sich analog zu Gleichung (5.43) berechnen. Das gesamte Supportvolumen V_S beläuft sich schließlich auf:

$$V_S = V_{S1} + V_{S2} \quad (5.44)$$

Die Kenngröße r_{SuppV} zur Quantifizierung des Support-Volumens ergibt sich somit aus dem Verhältnis der Summe des Supportvolumens V_S sowie V_P des Polyeders P zum Volumen V_{BB} der achsenorientierten Bounding Box:

$$r_{SuppV} = \frac{V_S + V_P}{V_{BB}} \quad (5.45)$$

5.5.3 Entfernbareit

Neben dem Einsatzzweck der Stützkonstruktionen (vgl. Abschnitt 2.5.3) und den daraus resultierenden Einflüssen auf die Oberflächenqualität und die Wirtschaftlichkeit, muss stets die Entfernbareit der Stützstrukturen gewährleistet sein. Dies bedeutet, dass die Zugänglichkeit der Kontaktstellen für entsprechende Werkzeuge gegeben sein muss. Hierzu wird ein kegelförmiger Arbeitsraum eingeführt, der abhängig von den Abmessungen und den notwendigen Freiheitsgraden (engl. *degree of freedom, DOF*) des Werkzeugs definiert wird. Entscheidend ist hier der Öffnungswinkel φ_w des Kegels. Zur Überprüfung der Gültigkeit des zur Verfügung

stehenden Arbeitsraums, werden ausgehend von jeder Kontaktfacette f_{down} oder f_{up} Strahlen r in definierten Winkelinkrementen $\Delta\varphi_{\alpha}$, $\Delta\varphi_{\beta}$ ausgesendet. Nur Strahlen r_{NI} , die keinen Schnittpunkt mit dem Objekt (Polyeder) aufweisen, werden zur Definition des Werkzeugraums herangezogen. Die Zusammenhänge verdeutlicht Abb. 5-26 am Beispiel eines Pfannengriffs. Zur Berechnung von Schnittpunkten zwischen einem Strahl r und einem Polyeder P kann ein naiver Ansatz verfolgt werden, indem jede Facette auf Durchdringung überprüft wird. Dies führt jedoch zu einem unverhältnismäßig hohen Rechenaufwand. Daher bietet sich hier die Anwendung binärer Raumpartitionierung (engl. *binary space partitioning*¹⁵ – *BSP*) an. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass nicht jede Facette des Polyeders auf Durchdringung getestet wird, sondern lediglich jede durch eine Facette aufgespannte Ebene. Der Abstand zwischen Strahlursprung und der Ebene lässt sich mit Hilfe von Gleichung (5.39) berechnen. Ist das Produkt aus Normalenvektor der Ebene n_E und Richtungsvektor p des Strahls gleich null, so liegen Strahl und Ebene parallel zueinander. Besitzt das Produkt ein positives Vorzeichen, so schneidet der Strahl die Ebene von der Rückseite, bei negativem Vorzeichen von der Vorderseite.

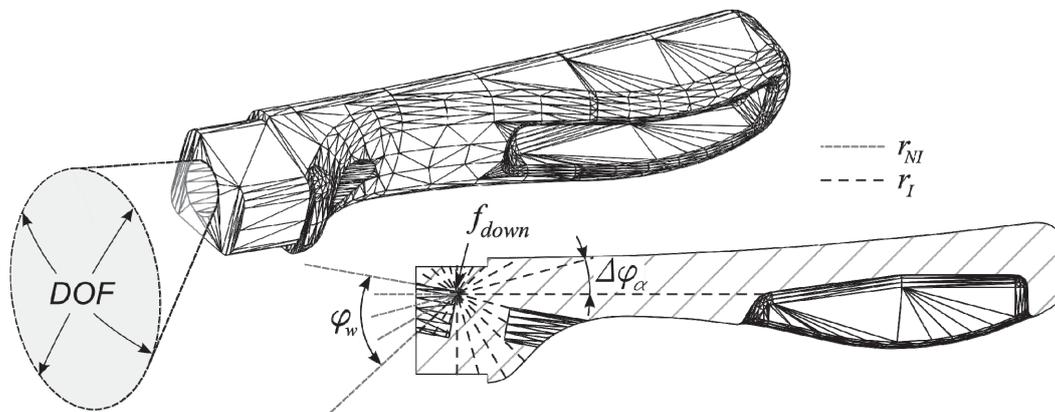


Abb. 5-26: Werkzeugarbeitsraum zur Entfernung von Supports

Das Volumen eines Polyeders kann als logischer Durchschnitt von Halbräumen, die durch die von den Facetten aufgespannten Ebenen definiert sind, verstanden werden [Ebe00]. Jede Durchdringung eines Strahls mit einer Facettenebene partitioniert den Strahl in zwei Regionen: *außen* und *innen*, jeweils bezogen auf die den Halbraum definierende Ebene. Hieraus lässt sich schließen, dass sich die resultierende Schnittgerade zwischen Strahl und Polyeder aus dem logischen Durchschnitt der im Inneren der Halbräume liegenden Teilstrahlen r_{in} ergibt. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes dient das folgende zweidimensionale Beispiel (siehe Abb. 5-27). Jeder Strahl, der einen Polyeder durchdringt, schneidet zunächst eine oder mehrere Ebenen von ihrer Vorderseite (Vorderebenen) und anschließend einige Ebenen von ihrer Rückseite (Rückebenen). Der logische Durchschnitt wird demnach vom Strahlursprung aus gesehen durch die letzte Vorderebene (hier: E_1) und die erste Rückebene begrenzt (hier: E_3). Wenn kein Schnittpunkt zwischen Strahl und Polyeder existiert, so durchdringt der Strahl r_{NI} eine Vorderebene nachdem eine oder mehrere Rückebenen durchstoßen wurden.

¹⁵ Als Binary Space Partitioning wird in diesem Kontext eine Methode zur Partitionierung eines Polyeders durch eine Menge von Hyperebenen bezeichnet.

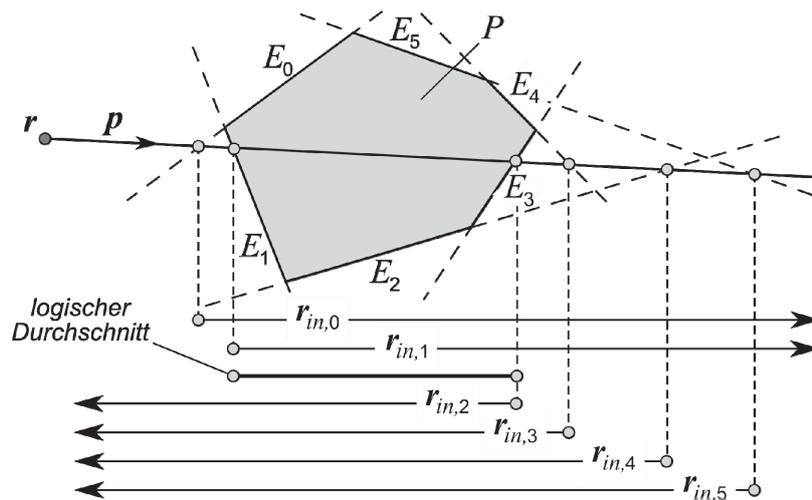


Abb. 5-27: Anwendung von BSP zur Ermittlung von Durchdringungen (in Anl. an [Ebe00])

Alle Strahlen r_{NI} definieren schließlich einen oder mehrere kegelförmige Volumina mit Öffnungswinkel φ_a , die zur Bewertung der Entfernbareit herangezogen werden können. Diese ist gegeben, wenn der zur Verfügung stehende Raum die Handhabbarkeit des Werkzeugs gewährleistet. Daher berechnet sich die Kenngröße r_{SuppR} zur Bewertung der Entfernbareit von Supports zu:

$$r_{SuppR} = \begin{cases} 0 & | \varphi_a \geq \varphi_w \\ 1 & | \varphi_a < \varphi_w \end{cases} \quad (5.46)$$

5.5.4 Bauteilstabilität

Bei allen generativen Verfahren ist stets die Bauteilstabilität zu jedem Zeitpunkt des Prozesses zu gewährleisten. Während bei einigen Verfahren das Ausgangsmaterial eine stützende Wirkung ausübt und nur eine gegebenenfalls seitliche Verschiebung zu verhindern ist, muss insbesondere bei Verfahren mit flüssigen bzw. teigigen Baumaterialien die Stabilität gesichert werden. Hierzu muss der Schwerpunkt für jede einzelne Schicht ermittelt werden, um zu prüfen, ob sich das Bauteil während des Bauprozesses in einer stabilen Lage befindet. Denn je nach Bauteilprägung kann vorübergehend ein instabiler Zustand entstehen, den es bei der Wahl der Bauteilorientierung zu vermeiden gilt. Die Prüfung des vollständigen Bauteils in Endlage genügt daher nicht. Lässt sich keine Orientierung mit einer durchgängig stabilen Lage ermitteln, sind an entsprechenden Stellen Stützkonstruktionen vorzusehen. Da diese jedoch stets zu einer Beeinträchtigung der Oberfläche und zu einem höheren Aufwand für die Nachbearbeitung führen, soll der Einsatz von Supports zunächst vermieden werden.

Ein stabiler Gleichgewichtszustand ist stets gegeben, wenn eine durch den Schwerpunkt des zu einem Zeitpunkt t_n betrachteten Schichtmodells P gezogene Lotrechte zur Bauteilplattform (Vektor p_{COG}) zu jedem Zeitpunkt des generativen Prozesses die Grundfläche A_G (Querschnittsfläche der 1. Schicht) schneidet (Abb. 5-28).

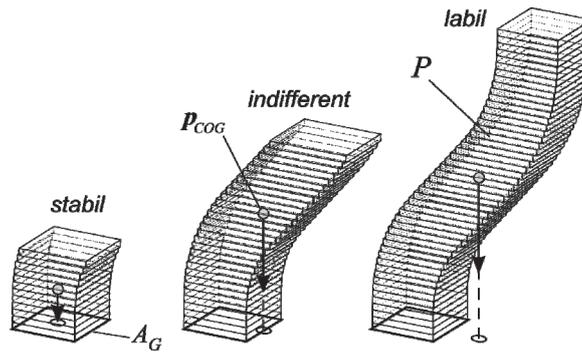


Abb. 5-28: Bauteilstabilität eines Schichtmodells

Die Koordinaten des Flächenschwerpunkts C eines Polygons P berechnen sich zu:

$$C_x = \frac{\sum C_{i,x} A_{P,i}}{\sum A_{P,i}}, \quad C_{i,x} = \frac{1}{6A_{P,i}} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (5.47)$$

$$C_y = \frac{\sum C_{i,y} A_{P,i}}{\sum A_{P,i}}, \quad C_{i,y} = \frac{1}{6A_{P,i}} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (5.48)$$

Ob sich der zum Zeitpunkt t projizierte Schwerpunkt innerhalb, außerhalb oder auf den Grenzkanten der Grundfläche A_G befindet, lässt sich anhand des Halbebenentests nach Gleichung (5.4) ermitteln. Eine entsprechende Kenngröße r_{SuppS} zur Bewertung der Bauteilstabilität während des Fertigungsprozesses ergibt sich somit zu:

$$r_{SuppS} = \begin{cases} 0 & | C_{temp,proj} \in A_G \\ 1 & | C_{temp,proj} \notin A_G \end{cases}, \quad C_{temp,proj} = (x, y, 0) \quad (5.49)$$

5.6 Minimierung der Fertigungskosten

Ein wesentlicher Aspekt bei der Betrachtung einer optimierten Bauteilorientierung stellt die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses, insbesondere die Höhe der orientierungsabhängigen Fertigungskosten dar. Diese werden vorrangig durch den Materialaufwand und die benötigte Bauzeit sowie den zeitlichen Aufwand für die Nachbearbeitung festgelegt. Da in der Regel belichtetes Material nicht wiederverwendet werden kann, ist neben dem für die Erstellung der Bauteilgeometrie notwendigen Material ebenfalls der Materialaufwand für eventuell anfallende Stützstrukturen zu berücksichtigen. Dies hat zur Folge, dass bei der Festlegung der Bauteilorientierung ein Minimum an Supportvolumen V_S , welches gemäß Abschnitt 5.5.2 berechnet werden kann, anzustreben ist. Unter Berücksichtigung des Bauteilvolumens V_P , der Werkstoffdichten ρ_P bzw. ρ_S und der Materialpreise p_P bzw. p_S je Kilogramm, setzen sich demnach die Materialkosten C_M zusammen aus den Kosten C_P für das Baumaterial sowie den Kosten C_S für das Stützmaterial:

$$C_M = C_P + C_S, \quad C_P = V_P \cdot \rho_P \cdot p_P \cdot 10^{-6}, \quad C_S = V_S \cdot \rho_S \cdot p_S \cdot 10^{-6} \quad (5.50)$$

Neben dem Materialaufwand stellt die Bauzeit einen signifikanten Kostenfaktor dar. Hier wird zwischen der Netto-Bauzeit des Bauteils und verfahrensspezifischen Nebenzeiten unterschieden. Nebenzeiten umfassen Zeiten der Vorbereitung (z. B. Einrichten, Aufheizen), des Post Processing (Nachvernetzen, Abkühlen u. a.) und des Finishing. Sie sind orientierungsunabhängig und können somit bei der Orientierungsoptimierung vernachlässigt werden. Die Netto-Bauzeit T_B in der Anlage setzt sich hauptsächlich aus den Belichtungszeiten T_E und Beschichtungszeiten T_C (*Recoating*) der einzelnen Schichten zusammen. Somit ergibt sich eine direkte Abhängigkeit zwischen Bauzeit T_B und Anzahl der zu fertigenden Schichten n . Da die Schichtanzahl sowie das Materialvolumen (Schichtvolumina V_{PL} und Supportvolumina V_{SL}) jedoch nicht getrennt voneinander berücksichtigt werden können, liefert die Kombination aus einer verfahrens- sowie materialabhängigen Volumenaufschmelzrate r_f und einer anwendungsspezifischen Beschichtungszeit T_C einen guten Anhaltspunkt. Übliche Werte für die Aufschmelzrate bewegen sich in einem Bereich von 1,5 bis 4 mm³/s. Mit einem angenommenen Maschinenstundensatz h_M folgt für die Kosten C_B der Netto-Bauzeit:

$$C_B = \frac{1}{3600} \cdot T_B \cdot h_M, \quad T_B = \sum_{i=1}^n \frac{V_{PL,i} + V_{SL,i}}{r_f} + T_C \quad (5.51)$$

Mit der Wahl unterschiedlicher Bauteilorientierungen verändert sich in der Regel die Kontaktfläche zwischen Bauteil und Supports. Dies kann zu einem hohen Nachbearbeitungsaufwand T_R zur Entfernung der Stützstrukturen führen. Zur Quantifizierung des zeitlichen Aufwands wird eine durchschnittliche Zeit t_R je mm² Kontaktfläche (A_{SC}) eingeführt. Dies führt zur durchschnittlichen Geschwindigkeit v_R . Unter Verwendung eines Stundensatzes h_R zur Support-Entfernung folgt für die orientierungsabhängigen Nachbearbeitungskosten C_R :

$$C_R = \frac{1}{3600} \cdot T_R \cdot h_R, \quad T_R = v_R \cdot A_{SC} \quad (5.52)$$

Die gesamten orientierungsabhängigen Fertigungskosten C_{Prod} setzen sich schließlich aus den Materialkosten C_M , den Baukosten C_B und den Nachbearbeitungskosten C_R zusammen:

$$C_{Prod} = C_M + C_B + C_R \quad (5.53)$$

Im Idealfall fallen keine Supports an, wodurch die Kosten für die Netto-Bauzeit sinken:

$$C_{B,opt} = \frac{1}{3600} \cdot T_{B,opt} \cdot h_M, \quad T_{B,opt} = \sum_{i=1}^n \frac{V_{PL,i}}{r_f} + T_C \quad (5.54)$$

Dadurch würden auch die Gesamtkosten insgesamt reduziert:

$$C_{Prod,opt} = C_P + C_{B,opt} \quad (5.55)$$

Die Kenngröße r_{Econ} zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses berechnet sich somit aus dem Verhältnis zwischen den Kosten im Optimalfall $C_{Prod,opt}$ und den tatsächlich anfallenden Kosten C_{Prod} :

$$r_{Econ} = 1 - \frac{C_{Prod,opt}}{C_{Prod}} \quad (5.56)$$

5.7 Optimierung der Bauraumausnutzung

Eine wirtschaftliche Bauteilanordnung im Bauraum einer GF-Anlage mit optimierter Volumenauslastung als Randbedingung erfordert die Kenntnis aller Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen bei der Festlegung der einzelnen Orientierungen. Aufgrund der sich hieraus ergebenden vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten und des daraus resultierenden hohen Rechenaufwands empfiehlt sich jedoch die sequenzielle Bearbeitung dieser beiden Optimierungsaufgaben. Daher erfordert der Prozess der Bauraumoptimierung das Vorliegen verschiedener Lösungskandidaten der Bauteilorientierung. Der hier vorgestellte Ansatz zur Lösung der Problemstellung berücksichtigt demzufolge den Umstand, dass nicht zufriedenstellende Ergebnisse der Bauraumoptimierung die Verwendung gleichwertiger Bauteilorientierungen oder sogar eine vollständige Neuoptimierung mit geänderten Randbedingungen erfordern können. Zum Verständnis der in Folge einer fehlgeschlagenen Bauraumoptimierung resultierenden Restriktionen für die Orientierung eines Bauteils wird das Konzept zur Optimierung der Bauraumausnutzung exemplarisch anhand des Laser-Sinter-Verfahrens näher erläutert.

5.7.1 Problemdefinition

Anders als bei herkömmlichen Packproblemen der Logistik entfallen bei der Bauraumoptimierung einer GF-Anlage übliche Restriktionen, wie z. B. die „Links-unten-Bündigkeit“ (engl. *bottom left justified*) in einer Anordnungsvariante. In der Rapid-Technologie sind die Bauteile vielmehr mit einem Mindestabstand zueinander zu versehen und möglichst ineinander verschachtelt, also nicht hüllkörperbasiert, anzuordnen. Hieraus ergibt sich, dass klassische Algorithmen der algorithmischen Geometrie nicht zur Lösung des vorliegenden Problems herangezogen werden können.

5.7.2 Das Optimierungsmodell

In diesem Abschnitt wird ein GF-spezifischer Optimierungsansatz unter Verwendung eines genetischen Algorithmus (siehe auch Abschnitt 6.2) vorgestellt. Die Anordnung der Bauteile erfolgt dabei objektbasiert. Die für die Optimierung notwendigen Restriktionen lassen sich aus den für eine allgemeine Packaufgabe relevanten Informationen ableiten:

1. **Die Bauteilorientierung** – Jedes anzuordnende Objekt besitzt ein lokales Koordinatensystem, entlang/um dessen Achsen Translationen/Rotationen zur Orientierung durchgeführt werden können. Im vorliegenden Fall werden bereits optimierte Bauteilorientierungen vorausgesetzt, so dass zur Positionierung der Bauteile lediglich Translationen im Raum sowie Drehungen um die z-Achse (Baurichtung) zulässig sind. Zur Eingrenzung des Suchraums wird die Anzahl möglicher Rotationen je Bauteil auf 36 (10° -Inkrement um die z-Achse) beschränkt.
2. **Die Bauteilrelationen** – Diese Information ist von besonderer Bedeutung. Sie gibt Aufschluss über zulässige Anordnungsmöglichkeiten zwischen zwei Objekten. Im Gegensatz zu klassischen Packaufgaben, bei denen zwei Objekte möglichst berührend angeordnet werden sollen, erfordern Laser-Sinter-Verfahren Mindestabstände zwischen den Bauteilen im Bauraum. Ebenso sollten Freiräume innerhalb von Kavitäten bereits angeordneter

Bauteile zur Positionierung genutzt werden. Um dies zu ermöglichen werden bei diesem Konzept an jedem Bauteil sogenannte „Anordnungspunkte“ definiert.

3. **Die Packreihenfolge** – Hierzu existieren die verschiedensten Ansätze. Intuitiv neigt man dazu, größere Objekte zuerst und anschließend kleinere Objekte in die verbleibenden Freiräume anzuordnen. Durch die Verwendung eines genetischen Algorithmus ist die genaue Kenntnis der Bauteilreihenfolge für diesen Ansatz nicht notwendig, da dieser für eine optimale Permutation der Packreihenfolge sorgt.

Zur Repräsentation oben genannter Angaben werden im genetischen Algorithmus drei Zahlencodes verwendet, die für die Auswertung einer Anordnungsvariante (Chromosom) herangezogen werden können. Dabei sind die Zahlencodes entsprechend Tab. 5-2 aufgebaut.

Tab. 5-2: Numerische Repräsentation von Anordnungsvarianten im Bauraum

Information	Zahlenrepräsentation	Wertebereich	Bemerkungen
Bauteilorientierung	Drehungen	0 ... 35	Vielfaches des 10°-Winkelinkrements, Mehrfachnennung möglich
Bauteilrelation	Anordnungspunkte	0 ... k	Kennziffer vordefinierter Punkte, Mehrfachnennung möglich
Packreihenfolge	Bauteilnummern	0 ... $n-1$	n = Anzahl der Bauteile, Mehrfachnennung nicht möglich

Der genetische Algorithmus liefert Permutationen von Anordnungsvarianten mit Hilfe der Zahlencodes. Die anschließende Auswertung einer entsprechenden Zielfunktion zur Bewertung einer Variante erfolgt auf der Basis einer Berechnung der maximalen Bauhöhe sowie auftretenden Durchdringungen. Die Verwendung genetischer Operatoren (siehe auch Abschnitt 6.2.6) ermöglicht die Generierung neuer Anordnungsvarianten bis die zu optimierende Zielfunktion ein vordefiniertes Konvergenzkriterium erfüllt. Weitere vorwiegend hüllkörperbasierte Ansätze zur Optimierung der Bauteilanordnung im Bauraum liefern [Hur01], [Iko97], [Lew03], [WFK94], [Yan08].

6 Methodische Umsetzung der Mehrzieloptimierung

In diesem Kapitel wird das in dieser Arbeit verwendete Optimierungsmodell vorgestellt, das mit Hilfe der Teillösungen der in Kapitel 5 entwickelten Algorithmen unter vorgegebenen fertigungstechnischen Randbedingungen bestmögliche Lösungen zur Entscheidungsfindung ermittelt. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei die Beurteilung einer Lösung sowie ein entsprechender Mechanismus zur dynamischen Veränderung des Optimierungsvorgangs zur effizienten Lösungssuche. Die Gegenüberstellung verschiedener Optimierungsmodelle zur Effizienzsteigerung ist jedoch in dieser Arbeit nicht Gegenstand der Betrachtung. Vielmehr wird die Auswahl des hier verwendeten Modells begründet und das Optimierungsverfahren selbst als integraler Bestandteil des Gesamtkonzepts vorgestellt. Zur Herleitung der Verfahrensauswahl werden zunächst die wesentlichsten Grundlagen aufgezeigt. Anschließend erfolgt eine Beschreibung des allgemeinen Verfahrensablaufs. Die Konfigurierung des Optimierungsalgorithmus erfolgt im Abschnitt 7.2.

6.1 Optimierungen

Unter einer Optimierung versteht man die Suche nach einem Optimum, also dem besten erreichbaren Resultat, unter gegebenen Voraus- und Zielsetzungen. Dabei handelt es sich in aller Regel um einen Kompromiss zwischen verschiedenen Parametern oder Eigenschaften eines meist komplexen Systems. Im Sinne einer Ablaufplanung kann ein Optimierungsvorgang auch als mathematische Entscheidungsvorbereitung angesehen werden. Die Ablauf- und Planungsforschung (engl. *operations research*), als Teilgebiet der angewandten Mathematik, beschäftigt sich eingehend mit der Optimierung von Prozessen durch die Anwendung mathematischer Modelle zur Entscheidungsfindung. Mathematisch gesprochen gilt es bei der Optimierung eine Zielfunktion $F(x)$ zu minimieren und gleichzeitig problemspezifische Restriktionen einzuhalten. Da die Maximierung einer Zielfunktion $F(x)$ äquivalent zur Minimierung von $-F(x)$ ist, stellt diese Aussage keine Einschränkung dar. Das einfachste Optimierungsproblem stellt die Ermittlung eines Minimums einer analytischen eindimensionalen Funktion dar. Dies entspricht der Berechnung von Nullstellen der ersten Ableitung. Häufig sind jedoch technische Anwendungsprobleme aufgrund ihrer Komplexität nicht analytisch (indirekt) lösbar. Daher haben sich auf dem Gebiet der mathematischen Optimierung zahlreiche Verfahren zur Lösung komplexer Problemstellungen etabliert. Ein guter Überblick über klassische aber auch modernere Optimierungsverfahren findet sich in [Pap96].

6.1.1 Klassifizierung der Optimierungsverfahren

Eine einheitliche Klassifizierung der Optimierungsverfahren ist aufgrund der Vielzahl kaum möglich. Grundsätzlich lassen sich jedoch die Verfahren bzw. die zugrunde gelegten Optimierungsmodelle in Anlehnung an [DoDr05] nach folgenden Gesichtspunkten unterteilen:

- Hinsichtlich des Informationsgrades in *deterministische* und *stochastische* Modelle. Ein deterministisches Optimierungsmodell liegt vor, wenn die Parameter der Zielfunktion(en) sowie der Nebenbedingung(en) als bekannt vorausgesetzt werden. Die unter gleichen Startbedingungen wiederholte Anwendung auf das gleiche Problem führt stets zu derselben Lösung. Enthält das Modell jedoch eine zufällige Komponente, z. B. einen Parameter als Zufallszahl, so liegt ein stochastisches Modell vor. Die wiederholte Anwendung auf ein und dasselbe Problem führt dann zu unterschiedlichen Lösungen.
- Bezüglich der Anzahl an Zielfunktionen in *uni-* und *multikriterielle* Modelle. Die Anwendung letzterer Modelle bezeichnet man auch als *Vektoroptimierung*.
- Hinsichtlich des Typs der Zielfunktion(en) in *lineare* und *nichtlineare* Modelle. Lineare Modelle bestehen aus einer/mehreren linearen Zielfunktion/en und zumeist einer Vielzahl von linearen Nebenbedingungen, d. h. Zielfunktionen und Restriktionen sind lineare Funktionen der Entscheidungsvariablen. Wesentliches Kennzeichen sowohl linearer als auch nichtlinearer Modelle ist die ausschließliche Verwendung kontinuierlicher reellwertiger Variablen.
- In Hinblick auf die Lösbarkeit in solche, die in Abhängigkeit ihrer Größe mit *polynomialem Rechenaufwand* lösbar sind und solche, für die sich die Größenordnung des Algorithmus nicht durch ein Polynom abschätzen lässt. Probleme mit letzterem Optimierungsmodell werden auch als \mathcal{NP} -schwer¹⁶ bezeichnet.

Neben dieser Unterteilung der Optimierungsmodelle lassen sich die einzelnen Optimierungsverfahren je nach Kontext z. B. in experimentelle oder mathematische Verfahren, also solche, die einen funktionalen Zusammenhang zwischen Gütekriterium und Suchvariablen aufweisen, einteilen. Eine weitere Möglichkeit der Einteilung ist die nach der Zeitvarianz des Optimums. So werden statische Optimierungsverfahren verwendet, wenn die Lage und der Wert des Optimums zeitinvariant sind. Ist dies nicht der Fall, so finden dynamische Verfahren ihre Anwendung. Im Folgenden wird eine Möglichkeit der Klassifizierung der Optimierungsverfahren für technische Anwendungen vorgestellt (Abb. 6-1). Dabei liegt der Fokus auf den numerischen (direkten) und statischen Verfahren. Die in dieser Arbeit vorliegende Optimierungsaufgabe schließt aufgrund des nichtlinearen Charakters die Anwendung linearer Optimierungsmodelle aus. Insbesondere das Vorliegen mehrerer Optimierungskriterien und die damit verbundene Komplexität beschränkt die Auswahl auf nichtlineare Modelle mit stochastischem Anteil. Rein stochastische Optimierungsverfahren, wie z. B. die *Monte-Carlo-Methode*, liefern jedoch häufig schlechte Ergebnisse aufgrund der unzureichenden Suchraumabdeckung. Daher werden diese Methoden im Allgemeinen mit Meta-Heuristiken¹⁷, wie dem *Simulated Annealing* oder der *Tabusuche*, kombiniert. Eine deutliche Verbesserung in der Lösungsfindung

¹⁶ Die Komplexitätsklasse \mathcal{NP} (nichtdeterministisch polynomiell) umfasst Optimierungsprobleme, für die bislang kein Algorithmus existiert, der auch das am schwierigsten zu lösende Problem desselben Typs mit polynomialem Aufwand löst.

¹⁷ Als heuristische Optimierungsverfahren (bzw. Heuristiken) bezeichnet man Verfahren, die in begrenzter Zeit und mit möglichst geringem Aufwand zulässige Lösungen liefern, ohne dabei eine Optimallösung zu garantieren.

lässt sich bei der Verwendung *evolutionärer Algorithmen* erkennen. Diese Optimierungsverfahren eignen sich besonders gut zur effizienten Suchraumexploration.

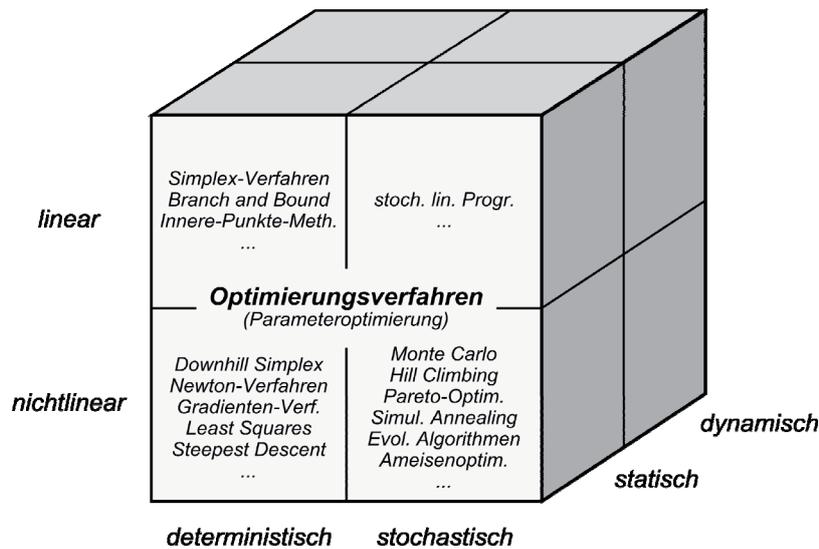


Abb. 6-1: Einteilung der Optimierungsverfahren

6.1.2 Mehrzieloptimierung

6.1.2.1 Definition

Höherdimensionale Optimierungsprobleme sind dadurch gekennzeichnet, dass die Zielfunktion $F: R \rightarrow \mathbb{R}^k$ k -dimensional ($k > 1$) ist. In diesem Fall liegt im Allgemeinen mehr als ein optimaler Lösungswert vor. Vielmehr existiert eine Menge optimaler Lösungen, die sogenannte *Pareto-Menge*. Ein Element dieser Menge wird als *Pareto-Punkt* oder auch *Pareto-optimale Lösung* bezeichnet. Eine Pareto-optimale Lösung bezüglich einer Gesamtzielfunktion F oder einer partiellen Zielfunktion f_i ist eine Lösung, die von keiner anderen Lösung aus dem Explorationsraum R *dominiert* wird. Bei zwei Lösungen p_1 und p_2 spricht man von *Pareto-Dominanz* der Lösung p_1 , wenn diese wenigstens bezüglich einer Bewertungsfunktion besser als p_2 und ansonsten nicht schlechter zu bewerten ist. Die Menge der Pareto-optimalen Lösungen wird auch als *Pareto-Front* bezeichnet. In Abb. 6-2 (links) wird die Definition der Pareto-Front exemplarisch für den Fall einer Maximierung einer zweidimensionalen Zielfunktion mit den Zielgrößen f_1 und f_2 veranschaulicht.

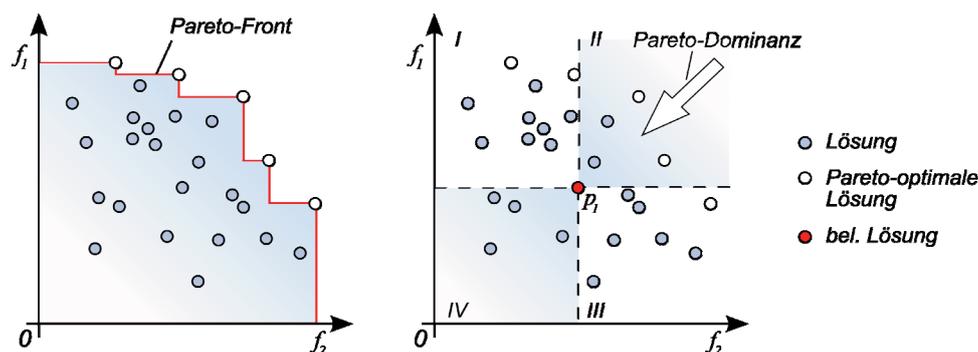


Abb. 6-2: Pareto-Front bei Mehrzieloptimierungen

Betrachtet man einen Beispielpunkt p_1 aus dem Explorationsraum (Abb. 6-2, rechts), so dominieren Lösungen des Quadranten II den Punkt p_1 . Lösungen des Quadranten IV werden dagegen von p_1 dominiert. Die übrigen Lösungen der Sektoren I und III sind nicht mit p_1 vergleichbar.

6.1.2.2 Leistungsbewertung von Algorithmen

Die Tatsache, dass Mehrzieloptimierungen in der Regel mehrere optimale Lösungen aufweisen, erschwert die Leistungsbewertung mehrdimensionaler Optimierungsalgorithmen. Daher bedient man sich zwei unterschiedlicher Ziele bei der Bewertung. Das erste Ziel ist die *Konvergenz* zur Pareto-Front. Das zweite und speziell für die Mehrzieloptimierung definierte Ziel ist die *Diversität* nichtdominierter Lösungen. Grundsätzlich stehen diese beiden Ziele in Konflikt miteinander. Die folgende Abbildung (Abb. 6-3) zeigt die Lösungsmengen einer zweidimensionalen Zielfunktion mit unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen. Der Algorithmus mit der linken Lösungsmenge weist eine gute Konvergenz zur theoretischen Pareto-Front auf, wohingegen eine nur schwache Diversität vorliegt. Der Algorithmus mit der rechten Lösungsmenge findet stark diversitäre Lösungen, jedoch liegen diese weit hinter der Pareto-Front. Das Ziel jeder Mehrzieloptimierung sollte also das Auffinden hoch diversitärer Lösungen sein, die sich so nah wie möglich an der theoretischen Pareto-Front befinden. Insgesamt ist das Ziel der Konvergenz jedoch höher zu bewerten als das der Diversität [TeHa07]. Im Hinblick auf diese beiden Bewertungskriterien eignen sich besonders evolutionäre Algorithmen zur Lösung mehrkriterieller Optimierungsprobleme. Dennoch gilt auch für diese Verfahren, dass bei Optimierungsproblemen mit mehr als drei Zielfunktionen eine vollständige Annäherung an die Pareto-Front nur schwer zu realisieren ist.

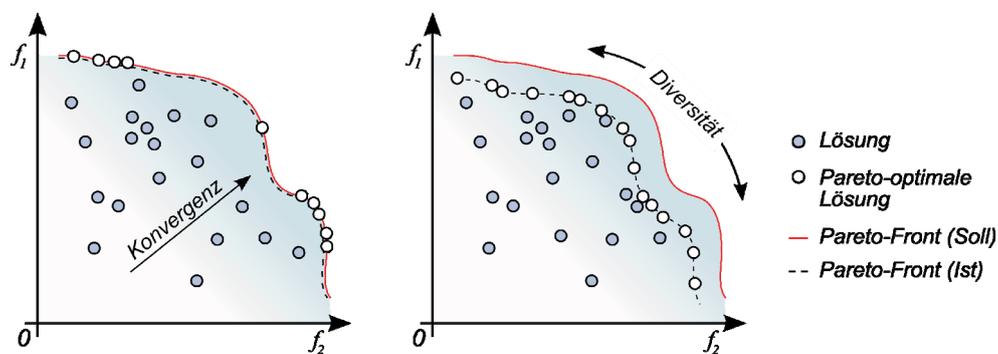


Abb. 6-3: Leistungsbewertung von Mehrzieloptimierungen

6.1.2.3 Bewertung mehrdimensionaler Zielfunktionen

Neben der Möglichkeit zur Leistungsbewertung eines Algorithmus nimmt die Vergleichbarkeit mehrerer Zielgrößen mit stark unterschiedlichen Größenordnungen eine wichtige Stellung ein. Bei Mehrzieloptimierungen stehen für k Optimierungskriterien in der Regel auch k Zielfunktionen $f_i: R \rightarrow \mathbb{R}$ ($i = 2, \dots, k$) zur Verfügung. Die zugehörigen Lösungskandidaten sollen trotz eventuell unterschiedlicher Gewichtungen gleichberechtigt berücksichtigt werden. Hierzu existieren drei grundlegend verschiedene Ansätze:

1. Gewichtung einzelner Zielgrößen in Abhängigkeit ihrer Wichtigkeit als Optimierungskriterium.

2. Entwurf des Algorithmus mit dem Ziel größtmöglicher Diversität ohne Kenntnis der Gewichtungsfaktoren für die Zielgrößen.
3. Iterative Interaktion des Anwenders während des Optimierungsvorgangs mit Hilfe von Zwischenlösungen.

Der erste Ansatz führt zu einer Modifikation der Bewertungsfunktion. So führen aggregierende¹⁸ Konzepte einzelne Zielfunktionen f_i zu einer Gesamtzielfunktion F zusammen. Dies kann z. B. die Bildung einer Linearkombination mit Gewichtungsfaktoren w als Koeffizienten sein:

$$F = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(r) \quad (6.1)$$

Mit Hilfe der Absolutwerte der subjektiven Gewichtungsfaktoren w_i lassen sich einzelne Kriterien hinsichtlich ihrer Wichtigkeit im Optimierungsprozess bewerten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ein großer Gewichtungsfaktor allein nicht zwangsläufig zu einem großen Einfluss bei der Optimierung führt. Vielmehr hängt der Einfluss eines Kriteriums ebenso von der Größe der partiellen Zielfunktion in Relation zu den restlichen Zielfunktionen (Schwankungsbreite) ab. Bei der Verwendung von Linearkombinationen besteht zudem die Gefahr, dass unterschiedliche Kombinationen der Funktionswerte identische Gesamtzielgrößen ergeben können. Dies kann dazu führen, dass nicht genügend Elemente der Pareto-Front gefunden werden. Eine alternative Vorgehensweise für maximierende Optimierungsaufgaben ist die Verwendung eines Produkts anstelle einer Summe. Auf diese Weise wirken sich Ausreißer wesentlich stärker auf die Gesamtzielgröße aus.

Algorithmusbasierte Ansätze zur Bewertung mehrdimensionaler Zielfunktionen berücksichtigen bereits beim Algorithmusentwurf Mechanismen zur diversitären Lösungsfindung. So lassen sich z. B. iterativ mehrere Optimierungen mit jeweils unterschiedlichen Werten für die Gewichtung durchführen. Aufgrund der unüberschaubaren Zahl von Techniken zur Umsetzung, wird hier lediglich auf weiterführende Literatur verwiesen [DoDr05], [TeHa07], [Wei07]. Insgesamt erfordert die Entscheidungsfindung bei Mehrzieloptimierungen die Kenntnis der Optimierungsaufgabe übergeordneter Informationen, die zumeist erfahrungsbasiert sind. Denn analog zu unikriteriellen Optimierungen ist eine Vielzahl von Kompromisslösungen meist unerwünscht. Abhilfe kann nur geschaffen werden, wenn a posteriori Präferenzen definiert werden [BIRi04].

6.1.3 Evolutionäre Algorithmen

Unter dem Begriff evolutionäre Algorithmen (EA, engl. *evolutionary algorithm* oder auch *evolutionary computation*) versteht man stochastische Suchverfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen, die sich die Prinzipien der biologischen Evolution zum Vorbild nehmen und mit einer Menge von Lösungen arbeiten. Dabei werden Optimallösungen durch iterative Verbesserung auf Basis des Variations-Selektions-Paradigmas approximiert. Aufgrund dieses Ansatzes ergeben sich einige grundlegende Unterschiede zu klassischen deterministischen sowie weiteren stochastischen Verfahren.

¹⁸ Als Aggregieren (von lat. *aggregare* = „anhäufen“) im Kontext statistischer Auswertung wird das Zusammenfassen von Daten bezeichnet.

Die wesentlichsten Unterschiede sind:

- Evolutionäre Algorithmen basieren auf Wahrscheinlichkeitsregeln, nicht auf deterministischen Regeln.
- EA arbeiten mengenbasiert, d. h. mit mehreren Lösungen gleichzeitig und nicht punktba- siert, also nicht von einem einzelnen Punkt des Suchraums aus.
- Voraussetzungen an den Suchraum sind nicht notwendig. Die zur Beurteilung einer Lö- sung notwendige Zielfunktion muss weder stetig noch differenzierbar sein.
- EA können sowohl im kontinuierlichen als auch im diskontinuierlichen und multimoda- len¹⁹ Funktionsraum angewendet werden, d. h. die Verarbeitung sowohl kontinuierlicher als auch diskreter Variablen ist möglich.
- Bei multimodalen Problemstellungen ergeben sich anstelle einer einzigen Lösung meist mehrere Lösungen von zum Teil vergleichbarer Qualität.

Seit mehr als 40 Jahren haben sich im Bereich der evolutionären Algorithmen im Wesentli- chen die drei folgenden Teilgebiete entwickelt (siehe auch Abb. 6-4):

- Evolutionsstrategien,
- genetische Algorithmen und
- die evolutionäre Programmierung.

Evolutionsstrategien finden ihren Ursprung in den sechziger Jahren und basieren maßgeblich auf den Arbeiten von RECHENBERG [Rec73] und SCHWEFEL [Sch75] zur Optimierung technisch- physikalischer Problemstellungen. Dabei werden kontinuierliche Parameter sowie Mechanis- men zur Selbstadaption ihrer steuernden Parameter verwendet. Genetische Algorithmen verwenden in ihrer ursprünglichen Form eine binäre Codierung. Daher eignen sie sich vor allem für Problemstellungen der kombinatorischen Optimierung. Im Gegensatz zu Evolutions- strategien und genetischen Algorithmen, die vor allem auf eine Parameteroptimierung ausge- richtet sind, hat die genetische Programmierung die Entwicklung optimaler Strategien in Form einfacher Computerprogramme zum Ziel. Dabei bestehen die Daten der Lösungskandi- daten nicht aus Zahlen bzw. Parametern, sondern vielmehr aus Berechnungsvorschriften. Aus diesen drei Grundströmen evolutionärer Algorithmen sind im Laufe der Jahre zahlreiche Weiterentwicklungen entstanden (Abb. 6-4).

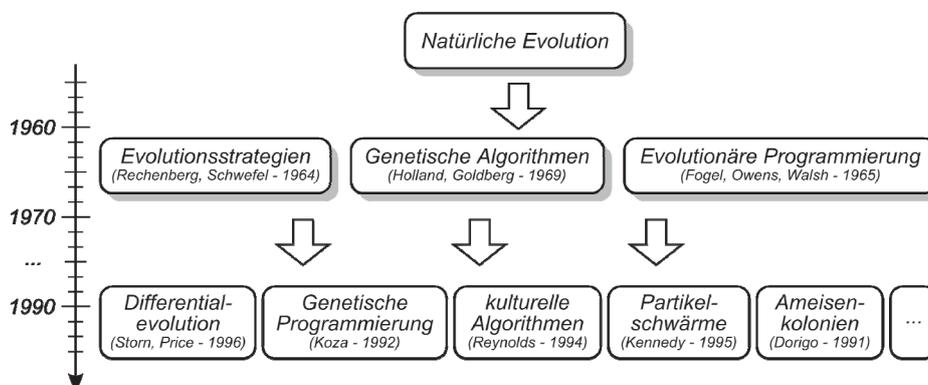


Abb. 6-4: Entwicklung evolutionärer Algorithmen

¹⁹ Funktionsräume werden als multimodal bezeichnet, wenn sie mehrere Optima (Minima od. Maxima) aufweisen.

Die einzelnen Ansätze evolutionärer Algorithmen bauen auf dem gleichen Prinzip auf, unterscheiden sich jedoch im Detail in der Realisierung. Bei dem Grundprinzip muss in einem ersten Schritt die Struktur der Lösungsfindung ermittelt werden, was zur Definition des Suchraums führt. Zur Evaluierung einzelner Kandidaten des Suchraums wird eine Zielfunktion verwendet, die in geeigneter Weise die Qualität der Lösungsvorschläge charakterisiert. In Anlehnung an die Evolution wird in der weiteren Vorgehensweise eine Anfangspopulation aus zufälligen Lösungen erzeugt, aus der schrittweise neue Generationen von Lösungen durch die Anwendung genetischer Operatoren (siehe auch Abschnitt 6.2.5) entstehen. Nach dem Selektionsprinzip „*survival of the fittest*“ werden gute Lösungen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit in die nächste Generation aufgenommen, so dass im Laufe der Optimierung der Selektionsdruck eine stetige Verbesserung der Lösungen bewirkt. Zur Beendigung der Optimierung können verschiedene Abbruchkriterien definiert werden. Dies kann das Erreichen eines Zielwertes, das Durchlaufen einer maximalen Anzahl an Iterationsschleifen oder das Auftreten von Konvergenz sein. Im letzten Fall unterscheiden sich demnach die Folgegenerationen nur noch minimal von den Vorgängergenerationen.

Evolutionäre Algorithmen zeichnen sich grundlegend durch ihre universellen Anwendungsmöglichkeiten aus. Sie werden jedoch vorwiegend eingesetzt, wenn klassische Optimierungsstrategien aufgrund fehlender Anwendbarkeit oder zu hoher Laufzeit nicht eingesetzt werden können. Zahlreiche Projekte belegen das Potenzial evolutionärer Algorithmen, jedoch erfordert der Einsatz grundlegende Kenntnisse. Einige Ansätze sehen die Verwendung sogar im Konstruktionsprozess vor [Sla03], [ReEk03]. Weiterführende Informationen zu den Grundlagen und zur praktischen Anwendung bieten [Niss97] und [Pohl99].

6.2 Genetischer Algorithmus

Ein genetischer Algorithmus (GA, engl. *genetic algorithm*) ist grundlegend durch eine probabilistische Elternselektion gekennzeichnet und verwendet die sog. Rekombination als primären Suchoperator. Ein weiterer Operator (Mutation) garantiert trotz geringer Anwendungswahrscheinlichkeit eine gute Abdeckung des Suchraums durch Aufrechterhaltung einer Grunddiversität [Wei07]. Die Vielfalt der in den vergangenen Jahrzehnten publizierten GA-Varianten ist mittlerweile so groß, dass in der vorliegenden Arbeit nur auf eine Auswahl wichtigster Inhalte eingegangen werden kann. Für weitergehende Fragestellungen wird entsprechend auf einschlägige Literatur verwiesen: [Col03], [GKK04], [Gol05], [Mit02].

6.2.1 Terminologie

Die vielfältigen Varianten evolutionärer Algorithmen sowie die einhergehenden zahlreichen Veröffentlichungen mit der entsprechend unterschiedlichen Verwendung von Begriffen erfordert eine einheitliche Begriffs- und Definitionsbasis. Dieser Abschnitt dient daher der Erläuterung wesentlicher Begriffe der Evolution, jedoch im Kontext genetischer Algorithmen. Weitere Begriffsdefinitionen finden sich in [VDI03].

Individuum

Im Zusammenhang mit genetischen Algorithmen versteht man unter einem Individuum eine mögliche Lösung eines Optimierungsproblems. Die Repräsentationsform ist zumeist von entscheidender Bedeutung und muss problemspezifisch ausgewählt werden. Grundsätzlich ist ein Individuum identisch zu einem Chromosom.

Population

Eine Population stellt die Gesamtheit aller Lösungskandidaten (Individuen/Chromosomen) eines Optimierungsproblems dar. Dabei teilen die Individuen strukturell ähnliche Eigenschaften hinsichtlich der Problemstellung. Das Populationskonzept ist ein Charakteristikum evolutionärer Algorithmen. So arbeiten auch genetische Algorithmen stets mit einer Population und nie mit einzelnen Individuen.

Generation

Eine Population zu einem bestimmten Zeitpunkt des genetischen Algorithmus wird als Generation bezeichnet. So entspricht jeder Generationswechsel einem Iterationsschritt im Algorithmus. Die sequenzielle Anwendung genetischer Operatoren (vgl. Abschnitt 6.2.5) führt sukzessiv zu neuen Generationen mit besseren Lösungen.

Gen

Einzelne Bereiche der Repräsentationsform eines Individuums werden in Anlehnung an die Evolutionstheorie als Gen bezeichnet. Ein Gen enthält einzelne Erbinformationen und somit Teileigenschaften eines Individuums.

Genom

In der Evolutionstheorie wird der zumeist diploide²⁰ Chromosomensatz mit den in ihm enthaltenen Genen, also die Gesamtheit der Erbinformationen, als Genom bezeichnet. Im Kontext eines genetischen Algorithmus repräsentiert ein Genom die Eigenschaften eines Individuums. Damit stellt ein Genom eine Datenstruktur zur Abbildung eines Individuums dar. Häufig werden bei genetischen Algorithmen reale Zahlen, binäre Zahlen, Bit-Strings oder Gray-Codes (siehe auch Abschnitt 6.2.3) verwendet. Denkbar sind jedoch auch komplexere Datenstrukturen, wie Pfade oder Bäume.

Allel

Als Allel wird eine mögliche Ausprägung eines Gens bezeichnet. In der Regel existieren von jedem Gen mehrere Allele, die sich in ihrem Durchsetzungsvermögen (dominant/rezessiv) unterscheiden. Bei binär codierten Individuen genetischer Algorithmen können die Allele somit nur die Werte 0 und 1 annehmen.

Genotyp

Allgemein stellt ein Genotyp eine Sequenz der Allele, also der Gene mit bestimmten Ausprägungen (Allelkombinationen), dar. Bei genetischen Algorithmen bezeichnet man die interne Repräsentation eines Individuums, also eine codierte Lösung, als Genotyp. Analog zum Programmierparadigma der objektorientierten Programmierung (OOP) kann ein Genotyp als eine Instanz der Klasse Genom angesehen werden.

²⁰ Höhere Lebewesen besitzen häufig einen doppelten Chromosomensatz. Dies wird als diploid bezeichnet. Ein einfacher (haploider) Chromosomensatz enthält dagegen jedes Chromosom nur einmal.

Phänotyp

Als Phänotyp bezeichnet man allgemein das äußere Erscheinungsbild der Gene. Im Kontext genetischer Algorithmen versteht man unter einem Phänotyp die decodierte Form eines Individuums, wobei die Codierungsmethode für das phänotypische Erscheinungsbild irrelevant ist. Somit handelt es sich bei einem Phänotyp um ein bewertetes Individuum.

Fitness

Zur Beurteilung der Güte eines Individuums und somit der Lösungsqualität eines Lösungskandidaten hinsichtlich der relevanten Zielkriterien, bedient man sich einer Fitnessfunktion, dessen Auswertung als Fitness oder auch *Score* bezeichnet wird und maßgeblich über die Anwendung genetischer Operatoren zur Reproduktion einer neuen Generation entscheidet.

Fitnesslandschaft

Der Suchraum eines genetischen Algorithmus ist durch seine Individuen (z. B. Variablensätze) gekennzeichnet. Wird jedem Punkt des Suchraums anhand der Zielfunktion ein Gütewert (Fitness) zugeordnet, so kann der Lösungsraum als hyperdimensionale Ergebnislandschaft angesehen werden (vgl. Abb. 6-5). Dies wird auch als Fitnesslandschaft bezeichnet und veranschaulicht lokale sowie globale Extrema in Abhängigkeit der Variationsparameter.

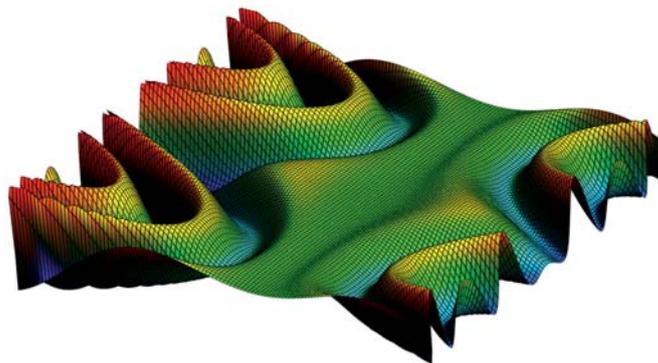


Abb. 6-5: Beispiel einer Fitnesslandschaft

6.2.2 Prinzipieller Ablauf

Obwohl eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten eines genetischen Algorithmus existiert, ist die Grundstruktur in ihrem Aufbau sehr ähnlich (siehe auch Abb. 6-6):

1. Genetische *Codierung* der Individuen.
2. Stochastische Initialisierung einer Anfangspopulation. Übliche Werte für die Anzahl der Individuen liegen zwischen 30 und 500 [Niss97].
3. Auswertung der Güte (*Fitness*) der einzelnen Individuen anhand einer aus den Zielkriterien abgeleiteten Fitnessfunktion. Dieser Vorgang wird auch als *Decodierung* bezeichnet.
4. Überprüfung der Abbruchbedingung(en). Solange die Abbruchbedingung/en nicht erfüllt ist/sind, wird der Algorithmus mit den Schritten 5-7 fortgeführt.
5. *Selektion* der Elternpaare und Erzeugung neuer Nachkommen durch *Rekombination*.
6. Eventuelle *Mutation* der erzeugten Nachkommen.
7. Abschluss der *Reproduktion* der neuen Population, anschließend weiter mit Schritt 3.

Die bekanntesten Grundvarianten genetischer Algorithmen sind zum einen der sog. *Standard-GA* (oder auch *Simple-GA*), der dadurch charakterisiert ist, dass am Ende jeder Generation die Elternpopulation vollständig durch Nachkommen ersetzt wird und zum anderen der sog. *Steady-State-GA*. Letzterer verwendet überlappende Populationen, wobei (im Gegensatz zum Standard-GA) je Generation lediglich ein Individuum erzeugt wird, das ein Individuum der Elternpopulation ersetzt und somit direkt in die Gesamtpopulation aufgenommen wird. Aufgrund des für die meisten Problemstellungen der algorithmischen Geometrie bewährten Einsatzes des Standard-GA, findet in dieser Arbeit diese Grundvariante Anwendung.

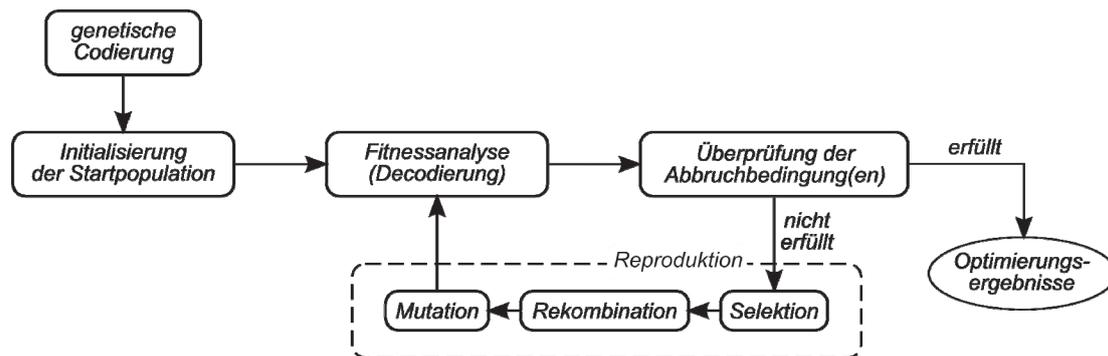


Abb. 6-6: Prinzipieller Ablauf eines GA

6.2.3 Codierung

Als Codierung wird die Definition einer für das zu lösende Optimierungsproblem geeigneten genetischen Repräsentation der Lösungskandidaten bezeichnet. Etwas anschaulicher kann die Repräsentation als Definition des Genotyps und die entsprechende Zuordnung zu dem dazugehörigen Phänotyp angesehen werden. Dieser Initialschritt ist entscheidend für den Erfolg eines genetischen Algorithmus. Dabei existiert keine allgemeingültige Lösung, vielmehr ist die Definition einer Lösungsrepräsentation stark problemabhängig und erfordert die Kenntnis möglicher Repräsentationsformen. Traditionell verwenden genetische Algorithmen eine binäre Lösungsrepräsentation. Dies ist die einfachste Codierungsform, bei der ein Genotyp aus einer binären Zeichenkette (Bit-String) besteht. Ein Nachteil dieser Codierungsform ist der, dass Invertierungen eines einzelnen Bits, also kleine Veränderungen, zu drastischen Änderungen der codierten Variablen führen können [Niss97]. Aus dem gleichen Grund kann sich die Codierung von im Lösungsraum benachbarten Werten in jedem einzelnen Bit unterscheiden. So würde z. B. die Anwendung genetischer Operatoren höchst selten von der Zahl 15 (binäre Darstellung: 01111) zur benachbarten Zahl 16 (binäre Darstellung: 10000) führen. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren häufig anstelle des Standard-Binärcodes der sogenannte *Gray Code* verwendet. Dieser Code dämpft den Streueffekt durch Reduzierung der sog. *Hamming-Distanz*. Im Kontext genetischer Algorithmen versteht man hierunter die Anzahl unterschiedlicher Bits beim positionsweisen Vergleich von zwei binären Codewörtern. Seien $x = (x_1, \dots, x_n)$ und $y = (y_1, \dots, y_n)$ zwei Bit-Strings gleicher Länge. Dann ist die Hamming-Distanz $\Delta_h(x, y)$ definiert als:

$$\Delta_h(x, y) = \sum_{x_i \neq y_i} 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (6.2)$$

Benachbarte Codewörter eines Gray Codes unterscheiden sich demnach nur in einer einzigen dualen Ziffer ($\Delta_h(x,y) = 1$). Als alternative Repräsentationsformen können nichtbinäre Darstellungen, wie Vektoren bzw. Matrizen reeller Zahlen oder auch Baumstrukturen, angewendet werden. Die Wahl einer geeigneten Lösungsrepräsentation ist jedoch in jedem Fall stets der vorliegenden Aufgabenstellung anzupassen. Während die Vielzahl praktischer Anwendungen eine konstante Repräsentationsform verwendet, existieren einige Ansätze die Lösungsrepräsentation variabel zu gestalten (z. B. [SmFo97]) oder sogar eine Diploidie nachzuahmen [YoAd94]. Letzteres hat den Vorteil, dass durch sich ändernde Randbedingungen ein Dominanzwechsel ausgelöst und somit eine GA-Population angepasst werden kann.

6.2.4 Fitnessfunktion

Die Fitnessfunktion eines genetischen Algorithmus stellt eine Ziel- bzw. Bewertungsfunktion dar, die jedem Element des Suchraums, d.h. jedem Lösungskandidaten, eine Bewertung zuordnet. Üblicherweise handelt es sich hierbei um eine positive reelle Zahl. Im Kontext der Evolutionstheorie bestimmt die Fitnessfunktion die Güte eines Individuums einer Generation. Die Fitness als Bewertungskriterium bezüglich der Reproduktionstauglichkeit eines Individuums und somit seiner Überlebenswahrscheinlichkeit ermöglicht erst das angesprochene Selektionsprinzip „*survival of the fittest*“. Die Fitness eines Individuums wird dabei im Allgemeinen auf Basis der Zielfunktionswerte im Vergleich zu den restlichen Individuen des Selektionspools bestimmt. Daher wird der Begriff Fitnessfunktion häufig synonym zur Zielfunktion verwendet. Dies ist jedoch nur bei nicht skalierten Zielfunktionswerten korrekt. Verwendet man eine Skalierung zur Beeinflussung der Selektionswahrscheinlichkeit, also des Selektionsdrucks insgesamt, so ergibt sich ein (nicht) linearer Zusammenhang zwischen Ziel- und Fitnessfunktion. Den Fitnesswert (Score) $\Phi(I)$ eines Individuums I (z. B. mit m Bits codiert) erhält man somit durch Einsetzen der mit Hilfe der Decodierungsfunktion Γ decodierten Variablenwerte a in die Zielfunktion F :

$$\Phi(I) = F(\Gamma(I)) , \quad I = (a_1, a_2, \dots, a_{m-1}, a_m) \in \{0,1\}^m \quad (6.3)$$

6.2.5 Abbruchkriterien

Abbruchkriterien entscheiden über das Laufverhalten eines genetischen Algorithmus. Häufig wird eine maximale Anzahl an Generationen als Abbruchkriterium gewählt. Daneben existieren jedoch weitere Möglichkeiten einen Optimierungslauf zu begrenzen. Diese Kriterien lassen sich nach [Pohl99] in direkte und abgeleitete Abbruchkriterien unterteilen.

Direkte Abbruchkriterien:

- maximale Anzahl an Generationen,
- maximale Rechenzeit,
- Differenz zwischen bestem Zielfunktionswert (Score) und einem vorgegebenen Wert.

Abgeleitete Abbruchkriterien:

- Standardabweichung der Scores der aktuellen Generation,

- Differenz zwischen Mittelwert der besten Scores der letzten Generation und bestem Score der aktuellen Generation,
- Differenz zwischen bestem und schlechtestem Score der aktuellen Generation,
- Quotient aus Mittelwert aller Scores und bestem Score der aktuellen Generation.

Die maximale Anzahl an Generationen sowie die maximale Rechenzeit als Abbruchkriterien führen in jedem Fall zu einer garantierten Beendigung des Algorithmus, während die übrigen Abbruchkriterien nicht zwangsläufig einen Abbruch bewirken. Daher sollten die gewählten Abbruchkriterien stets mit einem Abbruchkriterium mit Abbruchgarantie kombiniert werden.

6.2.6 Genetische Operatoren

Zur Sicherstellung einer größtmöglichen Abdeckung des Suchraums während des Optimierungsprozesses werden im Wesentlichen zwei Prozesse angewendet. Dies ist zum einen die *Exploitation*, d. h. zur Bestimmung des nächsten zu untersuchenden Punktes im Suchraum werden Informationen vorheriger besuchter Punkte verwendet. Solche Informationen können Gradienteninformationen oder Auswertungsergebnisse benachbarter Punkte sein. Dieser Prozess eignet sich gut zur Bestimmung lokaler Optima. Im Gegensatz dazu bewirkt die *Exploration* Sprünge in noch nicht durchlaufene Regionen des Suchraums. Zu diesen Punkten liegen in der Regel noch keine Informationen zur Güte vor. Exploration eignet sich insbesondere zur Lösung multimodaler Problemstellungen. Die richtige Kombination aus Exploitation und Exploration bestimmt also über den Erfolg eines genetischen Algorithmus. Hierzu dienen die beiden genetischen Operatoren Rekombination (mit exploitativem und explorativem Charakter) und Mutation (rein explorativ, bei Verwendung von Gray-Code jedoch exploitativ).

6.2.6.1 Selektion

Der Selektionsprozess bestimmt die Individuen, die zur Elterngeneration zugelassen werden und zur Erzeugung von Nachkommen dienen. Für diesen Prozess sind zwei Verfahren notwendig. Dies ist auf der einen Seite das Selektionsverfahren, das die erwartete Anzahl der Kopien eines Individuums bestimmt. Auf der anderen Seite legt das Auswahlverfahren die tatsächliche Anzahl fest. Die Differenz zwischen erwarteter und tatsächlicher Anzahl wird als *Spread* bezeichnet. Ist die Selektion eines Individuums ausschließlich von seiner Fitness abhängig, so dass lediglich die besten Individuen in die neue Generation aufgenommen werden, so wird dies als *harte* Selektion bezeichnet. Eine *weiche* Selektion dagegen räumt auch weniger fitten Individuen eine Reproduktionschance ein. Neben einer festgelegten Selektionsvorschrift besteht der Selektionsoperator noch aus einem nichtdeterministischen Anteil, der durch das sogenannte Selektionsrauschen (engl. *selection noise*) beschrieben wird. Hierdurch werden auch fitte Individuen vom Reproduktionsprozess ausgeschlossen. Insgesamt treibt die Selektion die Konvergenz an, reduziert jedoch die Diversität der Population.

SELEKTIONSVERFAHREN

Ein weit verbreitetes Selektionsverfahren stellt die *fitnessproportionale Selektion* dar. Hier steht die Selektion im direkten Verhältnis zum Fitnesswert eines Individuums. Die Selekti-

onswahrscheinlichkeit p_s eines Individuums I_i ergibt sich dabei nach POHLHEIM aus dem Fitnesswert $\Phi(I_i)$ des betrachteten Individuums und der gesamten Fitness des Selektionspools:

$$p_s(I_i) = \frac{\Phi(I_i)}{\sum_{j=1}^n \Phi(I_j)} \quad (6.4)$$

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der relativ hohe *Selektionsdruck*. Als Selektionsdruck wird die Auswahlwahrscheinlichkeit des besten Individuums, bezogen auf die durchschnittliche Selektionswahrscheinlichkeit aller Individuen des Selektionspools, bezeichnet. Ein zu niedriger Selektionsdruck führt dazu, dass der genetische Algorithmus nur langsam konvergiert. Bei steigendem Selektionsdruck dagegen schreitet die Evolution schneller voran, jedoch wird der Suchraum auch schneller eingegrenzt, d. h. der Explorationseffekt kommt immer weniger zum Tragen. Abhilfe kann ein alternatives Verfahren, die *rangbasierte Selektion*, schaffen. Bei diesem Verfahren werden die Individuen nach absteigendem Fitnesswert sortiert. Die Selektionswahrscheinlichkeit richtet sich dann ausschließlich nach dem Rang eines Individuums. Auf diese Weise kann der Selektionsdruck gezielt eingestellt werden. Bei diesem Verfahren ist jedoch von Nachteil, dass die absoluten Fitnessunterschiede keine Berücksichtigung finden, was z. B. bei gewünschter rascher Konvergenz der Population notwendig sein kann.

AUSWAHLVERFAHREN

Ein gängiges Auswahlverfahren für die Erzeugung von Elterngenerationen ist die *Roulette-Methode*. Dieses Auswahlverfahren ist ein stochastisches Verfahren und bedient sich dem fitnessproportionalen Selektionsprinzip. Ähnlich einem Rouletterad wird die Population einer Generation in n Abschnitte aufgeteilt, wobei n der Populationsgröße (Anzahl der Individuen) entspricht. Die Breite jedes Abschnitts ist von der absoluten Fitness eines Individuums abhängig und bestimmt somit die Auswahlwahrscheinlichkeit. Je höher die Fitness eines Individuums, desto breiter der Abschnitt auf dem Rouletterad und somit auch größer die Selektionswahrscheinlichkeit (Abb. 6-7a). Zur Erzeugung der Elterngeneration aus einer Population mit n Individuen wird die Roulette-Methode n -mal angewendet. Bei dieser Methode kann es jedoch dazu kommen, dass Individuen aufgrund ihres hohen Fitnesswertes mehrfach selektiert werden. Das kann unter Umständen zu einem zu hohen Selektionsdruck führen.

Ein ebenso häufig eingesetztes Auswahlverfahren, die sogenannte *Turnierselektion* oder auch *Wettkampfselektion*, zählt zu den rangbasierten Verfahren und beruht prinzipiell auf der Auswertung der Rangfolge zufällig ausgewählter ξ Individuen ($2 \leq \xi < n$) mit gleicher Selektionswahrscheinlichkeit p_s . Dieser Vorgang wird als Turnier bezeichnet. Die Anzahl der Turnierteilnehmer ξ bestimmt bei diesem Verfahren den Selektionsdruck. Entsprechend der Anzahl an Individuen n werden bei diesem Auswahlverfahren ebenso viele Turniere durchgeführt. Ein weiteres rangbasiertes Verfahren stellt die sogenannte *Truncation-Selektion* dar. Nach der Sortierung der Individuen entsprechend ihrer Fitnesswerte wird eine Schwelle (Truncation-Schwelle) definiert, ab der Individuen aus dem Reproduktionsprozess ausgeschlossen werden. Abb. 6-7b zeigt das Prinzip des Verfahrens für einen Selektionspool von 10 Individuen. Entsprechend seinem Rang erhält ein Individuum eine Selektionswahrschein-

lichkeit von 1 (guter Score) oder bei Unterschreiten der Truncation-Schwelle einen Wert von 0 (schlechter Score).

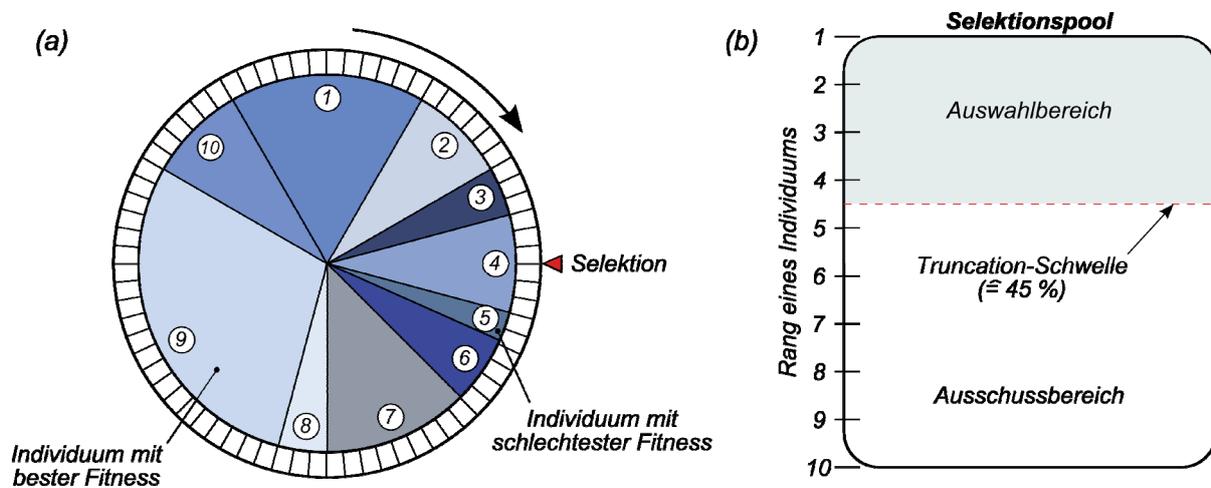


Abb. 6-7: Auswahlverfahren der Selektion

ELITE-SELEKTION (ELITISMUS)

Unabhängig vom verwendeten Selektions- und Auswahlverfahren kann in einem Optimierungsprozess das Prinzip der Elite-Selektion (engl. *elitist selection*) angewendet werden. Hierunter versteht man die automatische Übernahme des besten Individuums in die nächste Generation. Nach DE JONG [Jon75] kann dieses Prinzip auch auf die ξ besten Individuen ($1 \leq \xi < n$) ausgeweitet werden. Der stochastische Charakter der Selektion sowie der Operatoren Crossover und Mutation kann dazu führen, dass ein gefundenes Optimum im Laufe der Optimierung wieder verloren geht. Elitismus verhindert dies, kann jedoch umgekehrt auch dazu führen, dass der Optimierungsprozess auf einem lokalen Optimum stagniert.

6.2.6.2 Rekombination

Allgemein mischt der Variationsoperator *Rekombination* Informationen aus dem Erbmateriale von zwei oder mehreren Elternindividuen zu einem oder mehreren neuen Individuen (*Rekombinanten*). Genetische Algorithmen verwenden eine spezielle Form der Rekombination, das sogenannte *Crossover*, das analog zum biologischen Vorbild auf der Ebene der Genotypen arbeitet. Bei diesem Vorgang werden Chromosomen der Eltern (z. B. Bit-Strings) an einer oder mehreren stochastisch ermittelten Stellen aufgebrochen und kreuzweise wieder zusammengefügt. Der Operator Rekombination erhöht dadurch die Diversität in einer Population und bewirkt somit eine großflächige Suche nach einem Optimum im Suchraum. Er bildet demzufolge den Hauptoperator bei der Suche nach neuen Pareto-optimalen Lösungen. Die Wahrscheinlichkeit der Anwendung des Crossover $p_c \in [0,1]$ sollte erfahrungsgemäß zwischen 0,6 und 0,8 liegen.

Eine übliche Variante des Crossover ist das sogenannte *1-Punkt-Crossover* (engl. *one-point crossover*). Bei diesem Verfahren wird eine natürliche Zufallszahl ermittelt, die einen für beide Codierungsstrings identischen *Crossover-Punkt* festlegt. Alle Bitbelegungen rechts von dieser Bruchstelle werden anschließend zwischen den beiden Individuen ausgetauscht. In

Abb. 6-8 wird das Prinzip des Crossover anhand von zwei Individuen mit Binärcodierung zur Repräsentation einer natürlichen Zahl veranschaulicht.

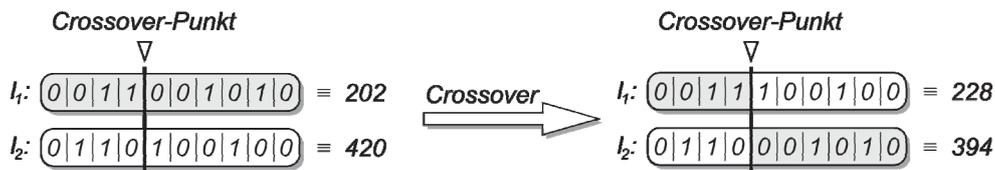


Abb. 6-8: 1-Punkt-Crossover

Das Prinzip des 1-Punkt-Crossover lässt sich auf ein *Mehrpunkt-Crossover* erweitern, indem n verschiedene Crossover-Punkte auf dem Codierungsstring verteilt werden. Anschließend wird jeder zweite Teilstring zwischen den Elternindividuen getauscht. Darüber hinaus existieren weitere Varianten des Crossover, wie z. B. das *Shuffle Crossover*, *Diagonal Crossover* oder das *Uniform Crossover*. Bei der letzten Variante wird bitweise mit Hilfe einer bitbezogenen Wahrscheinlichkeit über eine Vertauschung entschieden. Insgesamt entsprechen das 1- sowie das 2-Punkt-Crossover am ehesten der natürlichen Evolution, so dass die übrigen Varianten häufig als kritisch angesehen werden.

6.2.6.3 Mutation

Als *Mutation* bezeichnet man einen Variationsoperator, der die genetischen Erbinformationen eines Eltern-Genoms nach einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung zufällig abändert. Die genauen Vorgänge sind von der Codierungsform abhängig. So wird z. B. die Mutation bei binärer Codierung durch zufällige Negation einzelner Bits (Bit-Mutation) und bei einer reellwertigen Repräsentationsform durch Addition einer Zufallszahl aus einer geeigneten Verteilung realisiert. Eine Mutation bewirkt somit stets eine Änderung des Genotyps, jedoch nicht zwangsläufig eine Änderung des Phänotyps bzw. des assoziierten Fitnesswertes. Kommt es zu diesem eher seltenen Fall, so spricht man auch von einer *neutralen Mutation*. Die Wahrscheinlichkeit $p_m \in [0,1]$, mit der die Mutation bei einem Individuum greift, wird als *Mutationsrate* bezeichnet. Hiervon zu unterscheiden ist die *Mutationsstärke*, die ein Maß für die Standardabweichung, mit der ein elterlicher Suchraumparameter mutiert wird, darstellt. Die Mutationsstärke stellt somit ein Maß für die realisierte Anzahl an Nachbarschaftszuständen, also unterschiedlicher Zustände im Suchraum in unmittelbarer Umgebung, dar. Übliche Werte für die Mutationswahrscheinlichkeit p_m bewegen sich zwischen 10^{-6} und 0,1. Trotz zweitrangiger Bedeutung bildet die Mutation die Grundlage für Veränderungen im Evolutionsprozess und bewirkt in der praktischen Anwendung und bei Verwendung von Gray-Code eine lokale Suche im Lösungsraum.

6.2.6.4 Beispiel

Zur Veranschaulichung der Funktionsweise der drei wichtigsten Operatoren sowie ihre Einbindung in den genetischen Algorithmus dient ein durchgehendes Beispiel (Abb. 6-9). Es handelt sich hierbei um Individuen mit Binärcodierung einer ganzzahligen Suchraumvariablen. Höhere Werte führen in diesem Beispiel zu höheren Fitnesswerten. Anhand des Beispiels lässt sich erkennen wie mit Hilfe der genetischen Operatoren aus den Ausgangsindividuen neue und ggf. auch verbesserte Individuen entstehen.

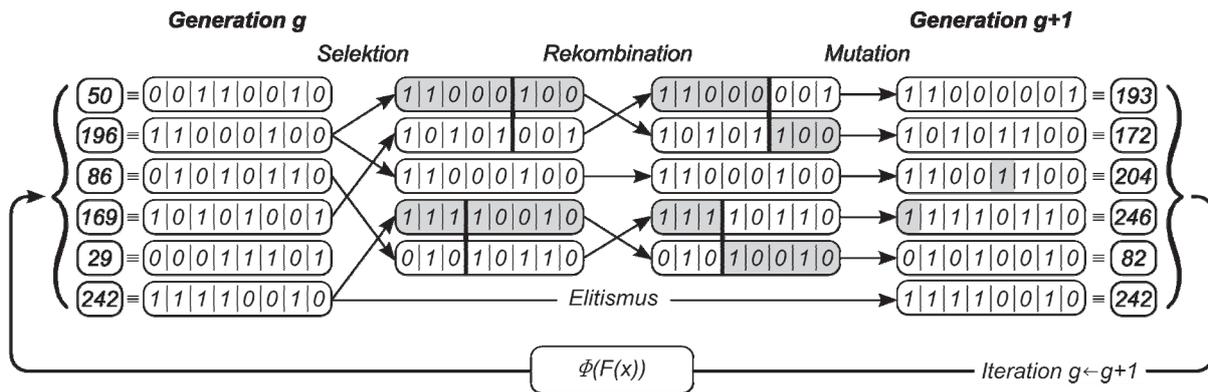


Abb. 6-9: Beispiel für die Anwendung genetischer Operatoren

6.2.6.5 Weitere Evolutionsfaktoren

Neben den bereits vorgestellten genetischen Operatoren existieren weitere Evolutionsfaktoren, die zur bedingten Steuerung des Evolutionsprozesses eingesetzt werden können, jedoch nicht notwendig sind. So stellt die sogenannte *Inversion* einen weiteren Mutationsoperator dar, der einen auf Zufallsbasis ausgewählten Teil eines Genotyps herausschneidet und in umgekehrter Reihenfolge wieder einsetzt. Der Evolutionsfaktor *Gendrift* stellt eine zufällige Veränderung der Genfrequenz in einer Population dar. Ursache hierfür ist die Veränderung (bis hin zum Aussterben) einzelner Gene durch Zufallseffekte. Somit ist die Veränderung in der Häufigkeit von Allelen und damit die Veränderung vorherrschender phänotypischer Merkmale unabhängig von der genetischen Fitness. Gendrift ist bei großen Populationen (> 10.000 Individuen) vernachlässigbar, während dieser Effekt bei kleinen Populationen (< 100 Individuen) einen wesentlichen Evolutionsfaktor darstellt. Als *Genfluss* wird der Effekt der Zu- bzw. Abwanderung (Migration) einzelner Individuen zwischen verschiedenen Populationen bezeichnet. Bei ausreichend hoher Migrationsrate kann der Gendrift-Effekt reduziert werden. Bei Standardvarianten genetischer Algorithmen findet der Genfluss keine Berücksichtigung, d.h. er wird nicht im Evolutionsprozess imitiert. Dieser Evolutionsfaktor findet seinen Einsatz ausschließlich bei Varianten, die mit mehreren Populationen gleichzeitig arbeiten (z. B. Steady-State-GA).

6.2.7 Konvergenz

Als Konvergenz im Sinne des Evolutionsprozesses wird der Prozess der Angleichung von Allelen in den Genen der Chromosomen einer Population bezeichnet. Aus technischer Sicht entspricht dies der Annäherung an einen stationären Systemzustand, wobei die betrachteten Zustandsvariablen zunehmend stabil gegenüber Änderungen werden. Genetische Algorithmen konvergieren im Gegensatz zu natürlichen Evolutionsprozessen, welche durch eine große räumliche Trennung, Nischenphänomene und eine großen Artenvielfalt gekennzeichnet sind, recht schnell. Grundsätzlich unterscheidet man nach [VDI03] die Gen-Konvergenz (vorzeitige Konvergenz) und die Konvergenz gegen Optimalzustände (lokale oder globale Konvergenz).

7 Gesamtkonzept und Realisierung

Dieses Kapitel beschreibt das Gesamtkonzept, bei dem die in Kapitel 5 entwickelten Teilkonzepte kombiniert werden und die aus den Teillösungen bestehende Zielfunktion mit Hilfe eines genetischen Algorithmus optimiert wird. Hierzu werden zunächst die elementarsten Schritte der Multizieloptimierung konzeptionell genannt. Anschließend wird in den folgenden Abschnitten die technische Umsetzung detaillierter erläutert. Ein entsprechender Programmablaufplan (PAP) findet sich in Abb. 7-1.

Der Optimierungsalgorithmus beginnt mit der Eingabe und Verarbeitung von Technologieparametern (statische Anlagen-/Prozessparameter), wie z. B. der verfahrensspezifischen Minimal-/Maximalschichtdicke, des Support-Grenzwinkels, anlagenspezifische Beschichtungszeiten, der materialabhängigen Volumenaufschmelzrate, etc. Diese werden für eine weitere Verwendung im Verlauf des Algorithmus aufgearbeitet und bereitgestellt. Die Eingabe erfolgt über eine ASCII-Textdatei, alternativ auch manuell über eine Eingabekonzole. Unter Verwendung einer computergestützten Verfahrensauswahl mit integrierter Datenbank, können notwendige Parameter ebenso direkt aus den Datenbanktabellen eingelesen werden. Erste Arbeiten hierzu finden sich in [Kas99] und [DaKö06]. Im Anschluss werden Konfigurationsparameter für den genetischen Algorithmus eingelesen. Sie dienen der Konfigurierung und steuern maßgeblich den Optimierungsverlauf. Zur Erfassung der Geometriedaten wird ein im STL-Format (ASCII oder binär) gespeichertes 3D-Netz eingelesen. Da aufgrund der Format-Restriktionen lediglich Geometriedaten, jedoch nicht die Nachbarschaftsbeziehungen des 3D-Netzes vorliegen, wird für eine weitere Verwendung die Topologie in Form einer Listenstruktur hergestellt. Da für einige Teilaufgaben lediglich die äußeren Punkte des Polygonnetzes von Interesse sind, wird in einem weiteren Schritt die konvexe Hülle erzeugt. Nach einer Initialisierungsphase, in der die Phänotypen definiert werden und die Initialpopulation erstellt wird, erfolgt in einem iterativen Prozess die Analyse und Bewertung des Bauteils für die verschiedenen in Form von Individuen der Population repräsentierten Orientierungen. Zu den Teilschritten gehören die anfängliche Transformation des Bauteils sowie der konvexen Hülle, die Berechnung der Bauteilhöhe mit Hilfe der achsenorientierten Bounding Box (AABB) und die Quantifizierung der Einfluss ausübenden Effekte. Letztere werden in einer Fitnessfunktion zusammengefasst und dienen der Bewertung der aktuellen Bauteilorientierung. Welche Effekte im Optimierungsprozess wahlweise zu berücksichtigen sind, richtet sich nach den spezifischen Gewichtungsfaktoren. Auf diese Weise kann eine Priorisierung der Optimierungsziele (Bauteilqualität versus Wirtschaftlichkeit) erfolgen. Nach Durchlauf der vollständigen Population wird das Konvergenzverhalten anhand zuvor definierter Konvergenzkriterien überprüft. Bei Nichterfüllung werden genetische Operatoren zur Exploration und Exploitation des Suchraums (mögliche Winkelkombinationen) angewendet. Diese Schritte wiederholen sich, bis im Laufe der Generationen ein Konvergenzkriterium greift. Das Resultat des Optimierungsalgorithmus liefert Orientierungsvorschläge entsprechend der zuvor definierten Anzahl zu spei-

chernder Genome. Das Bauteil lässt sich schließlich in einer gewünschten Orientierung für die weitere Verwendung im generativen Fertigungsprozess als STL-Datei exportieren.

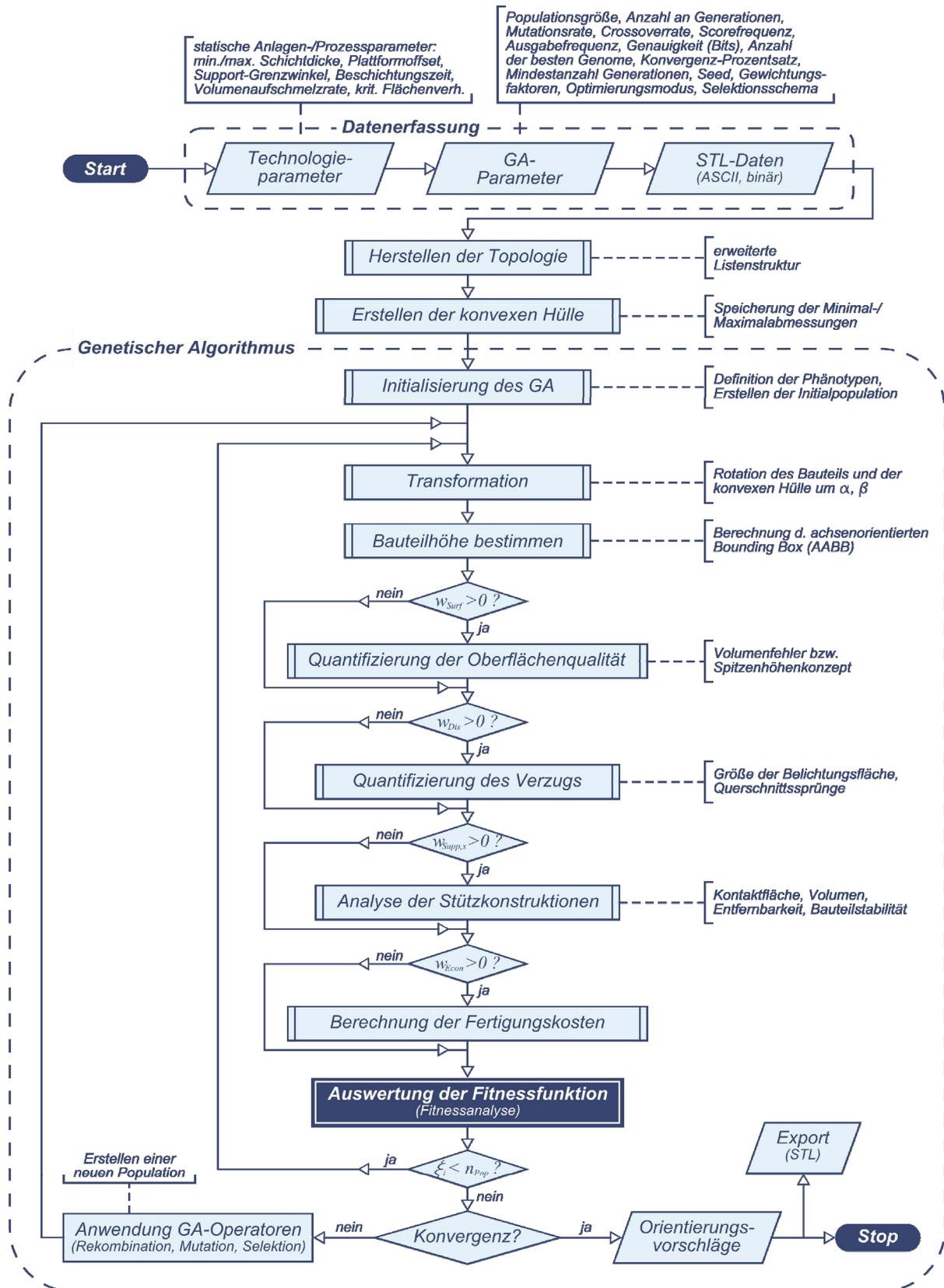


Abb. 7-1: Programmablaufplan zur Orientierungsoptimierung

7.1 Technische Implementierung

Im Folgenden wird kurz auf die technische Realisierung der konzipierten Anwendungslösung eingegangen. Da es sich hierbei lediglich um eine exemplarische Umsetzung des entwickelten Optimierungskonzepts handelt und nicht die Methoden sowie Bausteine der Softwaretechnik im Fokus stehen, wird für detailliertere Informationen hinsichtlich der verwendeten Bibliotheken sowie Methoden jeweils auf weiterführende Quellen verwiesen. Unter Verwendung der Programmiersprache C++ wurde die integrierte Entwicklungsumgebung Microsoft Visual Studio (Version 8) zur Applikationsentwicklung verwendet. Als standardisierte Programmiersprache unterstützt C++ mehrere Programmierparadigmen, wie die objektorientierte²¹, prozedurale²² sowie generische²³ Programmierung, die jeweils in unterschiedlicher Gewichtung hier zum Einsatz kamen. Zur besseren Manipulation geometrischer Objekte, insbesondere der hier vorliegenden Polygonnetze, wurde die Softwarebibliothek Wild Magic (Version 4.10) von Geometric Tools LLC [GeoTo] integriert. Vergleichbare Bibliotheken zur Lösung geometrischer Probleme sowie für Anwendungen der Computergrafik in C++ sind z. B. CGAL, LEDA, GeoLib, Wykobi, CPG, GPC, GEO. Zur Umsetzung des genetischen Optimierungsalgorithmus wurde die C++-Bibliothek GALib (Version 2.4.7) von MATTHEW WALL [Wall] verwendet. Alternative GA-Bibliotheken für C++ sind EO, GALOPPS, GAUL, GPdata, Lithos oder auch Pipe. In Abb. 7-2 ist eine Übersicht der wichtigsten in GALib zur Verfügung stehenden Klassen dargestellt. Die gekennzeichneten Klassen (*) wurden für die vorliegende Arbeit verwendet.

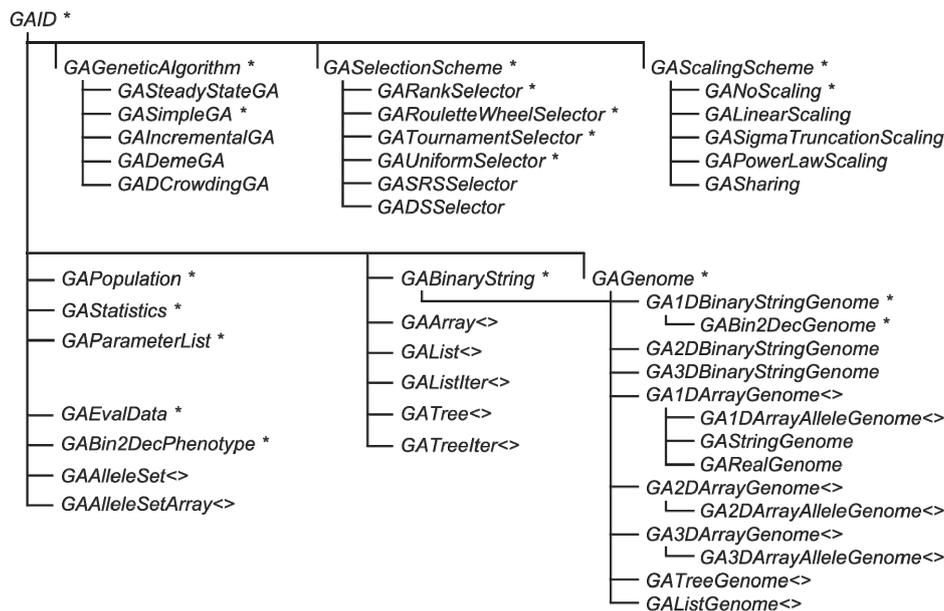


Abb. 7-2: Klassenhierarchie der Bibliothek GALib

²¹ Das Konzept der objektorientierten Programmierung besteht darin, Daten und Funktionen in einem Objekt zusammenzufassen und nach außen hin zu kapseln.

²² Prozedurale Programmierung führt zur Zerlegung eines Programms in mehrere (wieder verwendbare) Teilaufgaben, die als Prozeduren bezeichnet werden.

²³ Generische Programmierung bezeichnet ein Verfahren zur Entwicklung wieder verwendbarer Bibliotheken.

7.2 Konfigurierung des genetischen Algorithmus

Mit Hilfe der in Kapitel 5 erstellten Konzepte zur Lösung der Teilprobleme und den in Abschnitt 6.2 aufgeführten Erläuterungen zu genetischen Algorithmen, wird im Folgenden die Konfigurierung des genetischen Algorithmus vorgestellt. Hierbei handelt es sich um den Standard-GA bzw. Simple-GA nach GOLDBERG. Grundsätzlich entspricht dies dem in Abschnitt 6.2.2 dargestellten Ablauf. Die verwendeten Parameter und Einstellungen basieren auf zahlreichen eigenen durchgeführten Tests sowie Erfahrungswerten in einschlägiger Literatur [Col03], [Mit02], [Gol05], [LLM07], [Rot06], [Wei07].

7.2.1 Suchraum

Zur Bewältigung der Optimierungsaufgabe muss ein gegebenes Bauteil für eine Vielzahl verschiedener Orientierungen analysiert und hinsichtlich der definierten Kriterien bewertet werden. Daher besteht der Suchraum aus allen denkbaren Orientierungen in einem kartesischen Koordinatensystem, die durch die Rotation um zwei Achsen definiert werden. Beschränkt man sich auf die x- und die y-Achse des globalen Koordinatensystems, so kann jede Orientierung durch eine Rotation mit dem Winkel α um die x-Achse und eine Rotation mit dem Winkel β um die y-Achse beschrieben werden. Somit stellt die Winkelkombination α, β einen Lösungskandidaten I aus dem Suchraum dar:

$$I_i = \{\alpha, \beta\}, \quad 0 \leq \alpha \leq 360^\circ, \quad 0 \leq \beta \leq 180^\circ \quad (7.1)$$

7.2.2 Codierung

Zur Repräsentation der Rotationswinkel wird eine binäre Gray-Codierung verwendet. Mit Hilfe der Klasse `GABin2DecGenome` wird ein Genom definiert, das Dezimalwerte auf einen Binärstring (Bit-String) abbildet. Zur Codierung des Winkels α werden m Bits (hier: $m = 9$) und für den Winkel β , aufgrund des halben Wertebereichs, $m-1$ Bits eingesetzt. Eine konkrete codierte Winkelkombination als Lösungskandidat stellt somit eine Instanz des Genoms und demzufolge einen Genotyp dar. Die Klasse `GABin2DecPhenotype` ermöglicht das Mapping zwischen Binärstring und Dezimalwerten, also die Decodierung eines als Genotyp dargestellten bewerteten Individuums.

7.2.3 Anfangspopulation

Die Größe der Population μ wird über eine Eingabe-Datei eingelesen, umfasst aber in der entwickelten Applikation standardmäßig 75 Individuen. Zur Erstellung der Initialpopulation werden entsprechend die Variablen des Suchraums μ -mal stochastisch mit Werten belegt. Dabei sollte eine bestmögliche Gleichverteilung über die Menge der Lösungskandidaten gewährleistet werden. Anderenfalls würde dies zu einer frühzeitigen Beschränkung auf ein lokales Optimum führen. Da es sich hier um zwei als Bit-Strings repräsentierte Variablen mit insgesamt $2m-1$ Bits handelt, werden die einzelnen Bits unabhängig voneinander und mit der

gleichen Wahrscheinlichkeit auf den Wert 0 oder 1 gesetzt. Hierzu bedient man sich einer stets neu zu generierenden Zufallszahl ρ_{it} , so dass die Variablen a_i nach folgendem Schema belegt werden können:

$$I = (a_1, a_2, \dots, a_{j-1}, a_j) \in \{0,1\}^j, \quad a_j = \begin{cases} 0 & | 0 \leq \rho_j \leq 0.5 \\ 1 & | 0.5 < \rho_j \leq 1 \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, 2m-1 \quad (7.2)$$

7.2.4 Fitnessfunktion

Zur qualitativen Beurteilung einer Bauteilorientierung muss die als Genotyp codierte Lösungsrepräsentation wieder mit Hilfe der Decodierungsfunktion Γ entschlüsselt und in die Zielfunktion F eingesetzt werden. Die binäre Decodierung des vorliegenden Bit-Strings, bestehend aus j (hier: $j = 2$) Segmenten der Länge L_j (hier: $L_1 = m$, $L_2 = m-1$) Bits, erfolgt nach [Niss97] durch folgende Vorschrift:

$$\Gamma^j(a_{j1}, \dots, a_{jL_j}) = u_j + \frac{o_j - u_j}{2^{L_j} - 1} \left(\sum_{z=1}^{L_j} a_{j(L_j-z+1)} \cdot 2^{z-1} \right) = x_j \quad (7.3)$$

Dabei bezeichnen o_j und u_j den oberen bzw. unteren Grenzwert der Variable x_j . Die Zielfunktion F setzt sich schließlich aus den in Kapitel 5 erarbeiteten Kenngrößen r_x und ihren zugehörigen Gewichtungsfaktoren w_x zusammen:

$$F(\mathbf{a}_i) = w_{Height} \cdot r_{Height} + w_{Surf} \cdot r_{Surf} + w_{Dis} \cdot r_{Dis} + w_{SuppA} \cdot r_{SuppA} + w_{SuppV} \cdot r_{SuppV} + w_{SuppR} \cdot r_{SuppR} + w_{SuppS} \cdot r_{SuppS} + w_{Econ} \cdot r_{Econ}, \quad \mathbf{a}_i = (\alpha, \beta) \quad (7.4)$$

Im verwendeten Algorithmus erfolgt keine Skalierung zwischen Ziel- und Fitnessfunktion (Klasse `GANoScaling`). Daher gilt für die Fitnessfunktion Φ gemäß Gleichung (6.3):

$$\Phi(\mathbf{a}_i) = F(\mathbf{a}_i) \quad (7.5)$$

7.2.5 Genetische Operatoren

Die richtige Wahl der genetischen Operatoren stellt eine große Herausforderung dar, die stets problemspezifisch zu betrachten ist und somit auf Erfahrungswerten basiert. HONG et al. entwickelten einen genetischen Algorithmus mit dynamischer Anpassung der genetischen Operatoren im Verlauf des Optimierungsprozesses [Hon02], der schließlich zu besseren Ergebnissen führte. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch aufgrund fehlender Erfahrungswerte für die vorliegende Optimierungsaufgabe oder ähnliche Problemstellungen mit Werten gearbeitet, die sich für eine Vielzahl an GA-Problemstellungen bewährt haben und in dieser Arbeit durch Versuche verifiziert wurden. So beträgt die Mutationsrate bzw. Mutationswahrscheinlichkeit $p_m = 0,01$. Dies entspricht einem leicht über dem Durchschnitt liegenden Wert zur Realisierung einer lokalen Suche. Damit der Optimierungsprozess jedoch nicht frühzeitig

gegen ein lokales Optimum konvergiert, wird als Rekombinationsoperator das 1-Punkt-Crossover mit einer Crossover-Rate $p_c = 0,8$ angewendet. Des Weiteren findet zur Vermeidung einer frühzeitigen Verwerfung gefundener Optima die Elite-Selektion (Elitismus) Anwendung, so dass bei jedem Generationswechsel das beste Individuum in die neue Population überführt wird. Als Auswahlverfahren für den Selektionsprozess stehen vier verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung: Roulette-, Turnier-, Rang- und uniforme Selektion. Die ersten drei Verfahren wurden bereits im Abschnitt 6.2.6.1 erläutert. Bei der uniformen Selektion erhält jedes Individuum die gleiche Wahrscheinlichkeit. Trifft der Anwender keine Auswahl, so wird die fitnessproportionale Roulette-Selektion verwendet.

7.2.6 Abbruchkriterien

Der hier vorgestellte Algorithmus ist mit zwei verschiedenen Abbruchkriterien ausgestattet. Zum einen gilt die Optimierung als abgeschlossen, wenn die Änderung des Fitnesswertes des besten Individuums gegenüber den $n_{conv} = 30$ vorherigen Generationen weniger als einem vorgegebenen Konvergenz-Prozentsatz $p_{conv} = 0,01$ beträgt. Hiermit ist ebenfalls sichergestellt, dass mindestens n_{conv} Generationen durchlaufen werden. Zum anderen wird der Optimierungsvorgang spätestens nach einer maximalen Anzahl an Generationen $n_{Gen,max} = 80$ beendet, da ab hier keine Konvergenz mehr für dieses Optimierungsproblem zu erwarten ist.

7.3 Datenaufbereitung

In diesem Kapitel werden die eingesetzten Methoden zur problemspezifischen Datenaufbereitung vorgestellt. Da durch das Einlesen der im STL-Format gespeicherten Daten keine topologischen Informationen für die Netz-Manipulation zur Verfügung stehen, müssen zunächst auf Grundlage der Geometriedaten die Nachbarschaftsbeziehungen hergestellt werden. Zur Steigerung der Performance wird an ausgewählten Stellen mit der konvexen Hülle anstelle des vollständigen Polygonnetzes gearbeitet, so dass hier die Daten ebenfalls entsprechend aufbereitet werden müssen. Weitere Aufbereitungsmaßnahmen betreffen die affine Transformation des Bauteils sowie die Simulation des Schichtzerlegungsprozesses.

7.3.1 Speicherung heterogener Objekteigenschaften

Die Speicherung semantischer Informationen zur Gewährleistung von Konstruktionsabsichten gemäß Abschnitt 5.2 ist nicht als Datenaufbereitungsschritt im Rahmen des Optimierungsprozesses im engeren Sinne zu verstehen. Vielmehr handelt es sich um eine optionale Maßnahme, die derzeit, aufgrund fehlender Konvertierungsalgorithmen in der CAD-Umgebung, manuell vorzunehmen ist. Um jedoch auch die Kennzeichnung heterogener Eigenschaften im Optimierungsalgorithmus nutzen zu können, wird im Folgenden kurz auf die notwendigen Anpassungen im bestehenden De-facto-Standard STL eingegangen. Gemäß Abschnitt 4.1.3 besitzt das binäre STL-Format zwei bisher ungenutzte Bytes, die zur Attributierung von Facetten herangezogen werden können. Durch Aufschlüsselung der zur Verfügung stehenden 16 Bits gemäß Abb. 7-3 können die notwendigsten Attribute für einzelne Facetten für eine heterogene Objektrepräsentation vergeben werden. Die ersten zwei Bits ermöglichen die

Kennzeichnung von Flächen mit gehobenen Qualitätsanforderungen, wie z. B. Funktions- oder Designflächen, und eines gegebenenfalls notwendigen Schutzes vor angreifenden Supports. Ebenso können auf diese Weise gekennzeichnete Flächen vor horizontalen Ausrichtungen mit Print-Through-Effekt oder potenziellen Pulveranhaftungen bewahrt werden. Mit zwei weiteren Bits lassen sich entsprechend Abschnitt 5.3.2 verschiedene zulässige Spitzenhöhen c_{max} aus 4 vordefinierten Kategorien zuweisen. Nach dem gleichen Prinzip kann mit 3 Bits jeder Fläche ein Material aus einer Datenbank sowie mit 8 Bits (1 Byte) eine Farbe zugeordnet werden. Insbesondere die Farbzueweisung gestattet zudem eine umfangreiche Klassifizierung von Flächen innerhalb eines Bauteils, die für weitere Optimierungsschritte ausgewertet werden können. Ein einzelnes Bit bleibt ungenutzt und dient als Reserve.

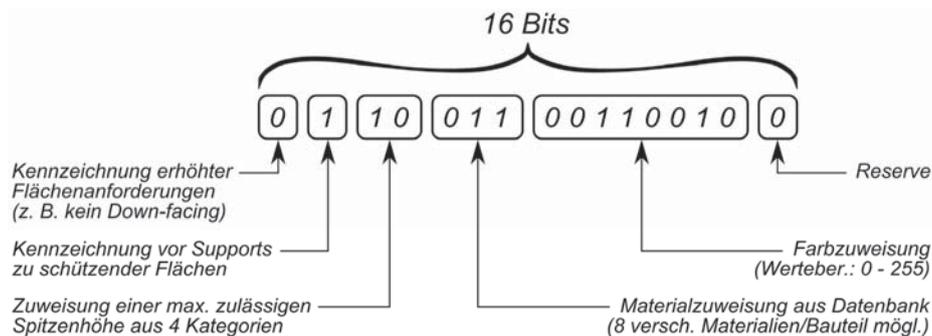


Abb. 7-3: Erweiterung des binären STL-Formats

7.3.2 Herstellen der Topologie

Zur algorithmischen Nutzung der eingelesenen Geometriedaten wird eine einfache Listenstruktur (vgl. Abb. 5-15) erstellt, indem für jedes eingelesene Dreieck die Koordinaten der zugehörigen Eckpunkte in einer Punktliste und die Indizes auf diese Punkte in einer Dreiecksliste abgelegt werden. Dabei wird stets auf vorhandene Duplikate überprüft. Diese Listenstruktur ist Ausgangspunkt für alle Berechnungen, die unabhängig von der Schichtzerlegung erfolgen, und wird in Form eines in dieser Arbeit eingeführten Applikationsnetzes (engl. *application mesh* – *AMesh*) gespeichert. Für die Schichtzerlegung müssen darüber hinaus weitere Daten gespeichert werden, so dass in einem eingeführten Zerlegungsnetz (engl. *clipping mesh* – *CMesh*) die in dieser Arbeit entwickelte erweiterte Listenstruktur (vgl. Abb. 5-16) zum Einsatz kommt. Dabei handelt es sich um ein vererbtes *AMesh* mit weiteren Methoden und Eigenschaften.

7.3.3 Konvexe Hülle

Zur Reduzierung des Berechnungsaufwands wird die konvexe Hülle des Polygonnetzes in Anlehnung an O'ROURKE [Oro98] berechnet (vgl. Abschnitt 5.1.4.1) und in einer gesonderten Datenstruktur für weitere Prozeduren zur Verfügung gestellt. Zur Ermittlung der Minimal- und Maximalabmessungen als Referenzwert zur Beurteilung der Bauteilhöhe in einer untersuchten Orientierung, wird auf Basis der konvexen Hülle der zugehörige Durchmesser gemäß Abschnitt 5.1.4.2 mit Hilfe der Rotating-Calipers-Methode berechnet. Die Erzeugung der konvexen Hülle mit dem in dieser Arbeit verwendeten Algorithmus und die damit verbundene Reduzierung der Punktmenge auf eine deutlich kleinere Teilmenge zeigt Abb. 7-4 exemplar-

risch an einem Motorblock. Hier konnte sowohl die Anzahl der Flächen als auch die Anzahl der Eckpunkte um 99,2 % reduziert werden.

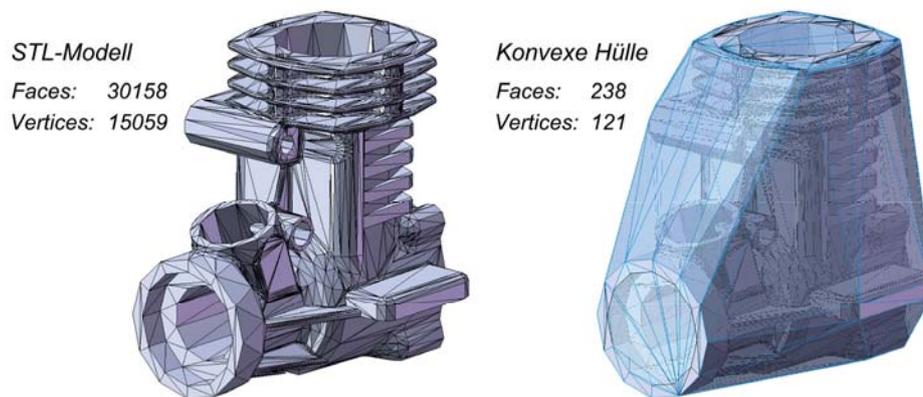


Abb. 7-4: Konvexe Hülle eines Motorblocks

7.3.4 Affine Transformation

Der Initialschritt zur Bewertung von Individuen jeder neuen Generation ist die affine Transformation des Bauteils. Hierfür wird das Bauteil aus seiner ursprünglichen Lage mit Hilfe der im Laufe des genetischen Algorithmus ermittelten Rotationswinkel α und β transformiert. Unter Verwendung von Gleichung (5.15) ergibt sich für die Transformation eines Vertex v_i des Polygonnetzes P mit n verschiedenen Eckpunkten:

$$v'_i = p_i v_i \bar{p}_i, \quad p_i = q_\alpha \cdot q_\beta = \begin{pmatrix} w_\alpha w_\beta - x_\alpha x_\beta - y_\alpha y_\beta - z_\alpha z_\beta \\ w_\alpha x_\beta + x_\alpha w_\beta + y_\alpha z_\beta - z_\alpha y_\beta \\ w_\alpha y_\beta - x_\alpha z_\beta + y_\alpha w_\beta + z_\alpha x_\beta \\ w_\alpha z_\beta + x_\alpha y_\beta - y_\alpha x_\beta + z_\alpha w_\beta \end{pmatrix}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (7.6)$$

Die Transformation erfolgt für das Polygonnetz in einfacher Listenstruktur (AMesh) sowie für die konvexe Hülle $CH(\text{AMesh})$.

7.3.5 Clipping

Ein essentieller Schritt zur Umsetzung der in Kapitel 5 entwickelten Algorithmen ist die Simulation des Schichtzerlegungsprozesses. Hierzu wird das sogenannte *Clipping*²⁴ angewendet. Auf die hier vorliegende Problemstellung bezogen bedeutet dies, dass das Polygonnetz in Anlehnung an Abschnitt 5.1.2.5 iterativ an einer in Baurichtung (z-Achse) wandernden Ebene geschnitten wird. Aus Gründen der Einsparung von Speicherbedarf wird das Polygonnetz von unten (Plattformebene) nach oben (positive z-Richtung) geschnitten, wobei nach dem Clipping stets die obere (positive) Hälfte des Polygonnetzes für den iterativen Zerlegungsprozess weiterverwendet wird. Die Volumina der einzelnen Schichten ergeben sich somit aus den Differenzen aufeinanderfolgender Teilpolyeder. Da der Schichtzerlegungsprozess aus der

²⁴ Als Clipping bezeichnet man in der Computergrafik das Beschneiden von Objekten anhand von Ebenen (\mathbb{R}^3).

mehrfachen Anwendung einer Ebene-Dreieck-Durchdringung besteht, müssen einige Sonderfälle berücksichtigt werden, die beim Clipping eines Polyeders auftreten können (Abb. 7-5). Insbesondere spezielle Ebene-Dreieck-Konstellationen können aus Gründen der Algorithmus-Performance vernachlässigt werden, da sie für das Auffinden der Schnittpolygone oder zur Ermittlung der Schichtvolumina nicht von Interesse sind.

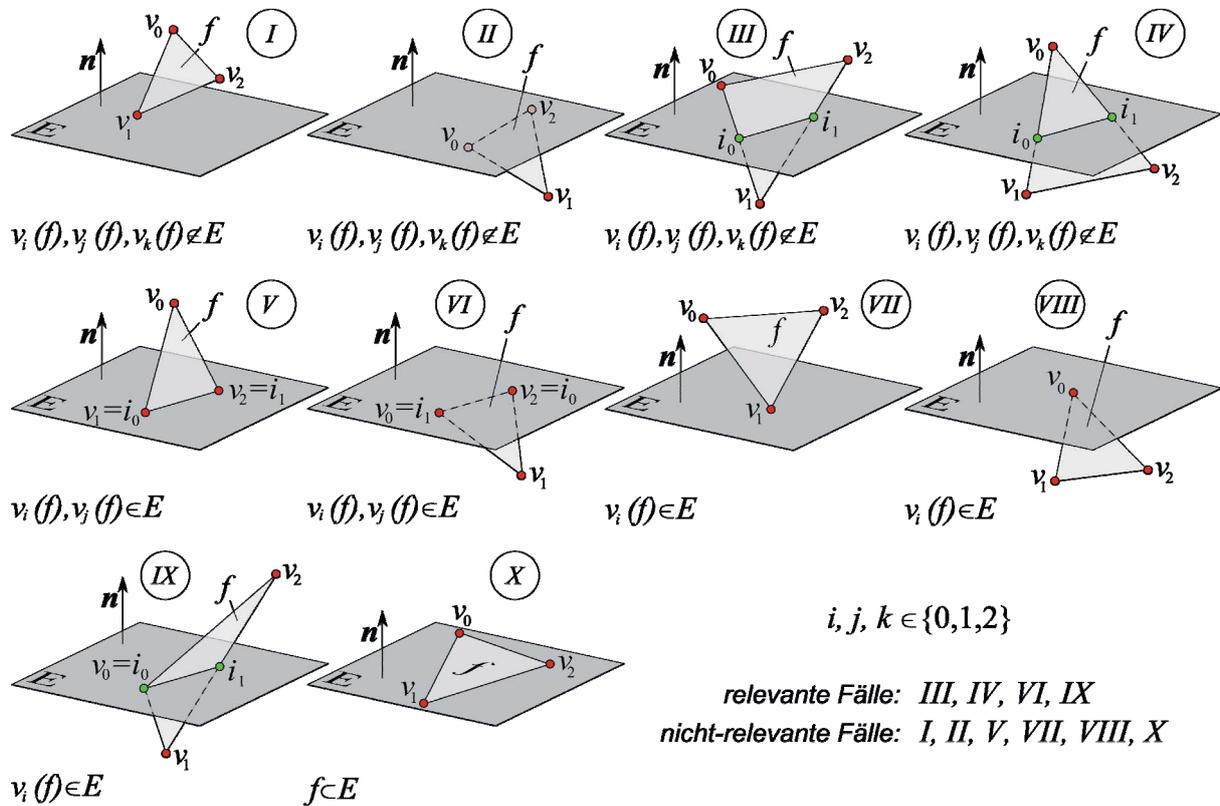


Abb. 7-5: Sonderfälle der Ebene-Dreieck-Durchdringung beim Clipping

Der Ablauf für das Clipping gliedert sich wie folgt:

- Berechnung des vorzeichenbehafteten Abstands jedes Eckpunkts zur Ebene $\Delta(v_i, E)$ mit Hilfe des Halbraumtests nach Gleichung (5.3)
- Überprüfung aller Kanten $e_i(v_S, v_E)$ mit Start-Vertex v_S und End-Vertex v_E ob diese von der Ebene E geschnitten werden. Falls $\Delta(v_S, E)$ und $\Delta(v_E, E) > 0$, dann behalte $e_i(v_S, v_E)$. Falls $\Delta(v_S, E)$ und $\Delta(v_E, E) < 0$, dann lösche $e_i(v_S, v_E)$.
- Berechne für jede Kante $e_i(v_S, v_E)$ den Schnittpunkt $i_{e,i}$ mit der Ebene E
- Überprüfe jede Facette $f_i(v_0, v_1, v_2)$ auf Durchdringung durch Analyse der zugehörigen Kanten. Ignoriere Fälle *I, II, V, VII, VIII* und *X* gemäß Abb. 7-5. Berechne für Fälle *III, IV* und *IX* die Schnittgerade. Für Fall *VI* übernehme die Kante $e_i(v_i, v_j)$ mit $\Delta(v_{i,j}, E) = 0$.
- Schließe für den volumenorientierten Ansatz das positive Restpolyeder zur Bestimmung des Volumens nach Gleichung (5.7)
- Ordne alle Schnittkanten in der Ebene E zu einem geschlossenen Polygonzug, ggf. zu mehreren geschlossenen Polygonzügen
- Trianguliere die Polygonzüge nach dem Ear-Clipping-Algorithmus (Abschnitt 5.1.2.6) zur Berechnung des Flächeninhalts der Polygonfläche nach Gleichung (5.5). Dieser entspricht der Querschnittsfläche der betrachteten Schicht.

- Im Fall des volumenorientierten Ansatzes, berechne das Volumen der Schicht (Querschnittsfläche \times Schichtdicke)
- Bereinige die erweiterte Listenstruktur (CMesh) und entferne nicht sichtbare Elemente für die nächste Schnittberechnung

Da in dieser Arbeit bewusst auf geometrische Einschränkungen, wie sie häufig in der Literatur zur Lösung ähnlicher Problemstellungen vorgenommen werden (z. B. Beschränkung auf konvexe Körper), verzichtet wurde, stellt das Handling mehrerer und gegebenenfalls verschachtelter Polygonzüge eine besondere Herausforderung dar. Hierzu müssen die ungeordneten Schnittkurven in einem ersten Schritt zu geschlossenen Polygonzügen sortiert werden. Unter Berücksichtigung der positiven Richtung der Schnittkanten können diese nach folgendem Algorithmus zusammengesetzt werden:

- Beginne mit beliebiger Kante $e_i(v_S, v_E) \rightarrow e_0$
- Suche Kanten $e_{i+1}(v_S, v_E)$ mit $v_S(e_{i+1}) = v_E(e_i)$ zum Anhängen
- Falls gilt $v_E(e_{i+1}) = v_S(e_0)$, dann schließe aktuellen Polygonzug
- Wiederhole Schritte 1 – 3 bis alle Kanten einem Polygonzug zugeordnet wurden

Zur Berechnung des Flächeninhalts ist die relative Lage der Polygone zueinander nicht von Bedeutung. Hier genügt die Einhaltung der in Abschnitt 5.1.2.1 getroffenen Konvention des Umlaufsinn polygonaler Flächen: Außenkanten entgegen, Innenkanten mit dem Uhrzeigersinn. Zur Bestimmung der Volumenabweichung zwischen Schicht- und Facettenmodell ist jedoch die genaue Kenntnis der Polygon-Anordnung notwendig, so dass diese zunächst ermittelt werden muss. Auch wenn aufgrund des Umlaufsinn prinzipiell bekannt ist, ob es sich um eine Außen- oder Innenkontur handelt, so genügt dies nicht zur vollständigen Definition der Gesamtschnittfläche (siehe Abb. 7-6).

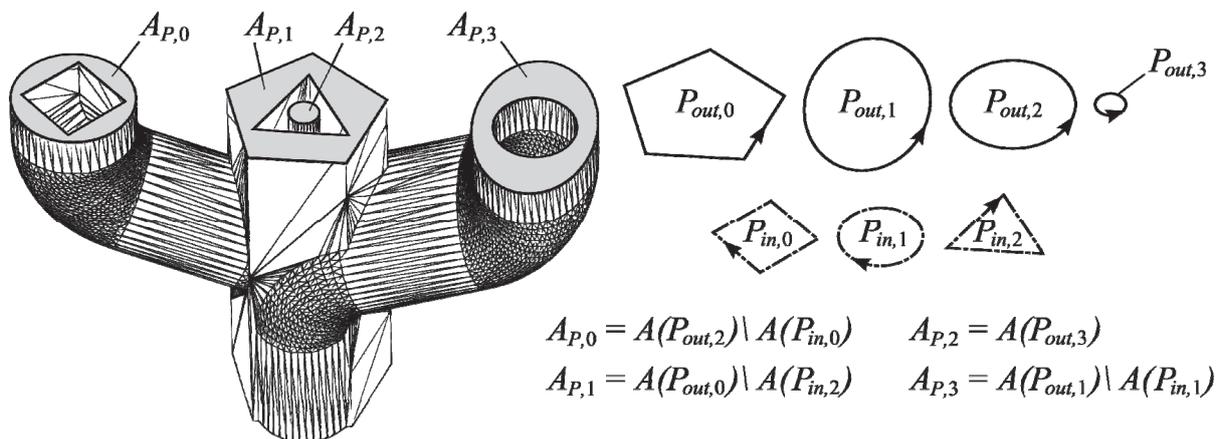


Abb. 7-6: Polygon-Anordnung zur geometrischen Definition von Flächen

Zur Lösung dieser Aufgabe wird angenommen, dass es sich bei den betrachteten 3D-Netzen stets um 2-mannigfaltige²⁵ Polygonnetze handelt. Dies führt dazu, dass eine Fläche mit Berandung P_{out} bzw. P_{in} stets eine echte Teilmenge einer der anderen Flächen darstellt oder ihr Durchschnitt der leeren Menge entspricht, aber sich die Polygone niemals überschneiden

²⁵ Im Zusammenhang mit Polygonnetzen ist eine 2-Mannigfaltigkeit gegeben, wenn jede Kante (Edge) zwei adjazente Flächen (Faces) besitzt.

oder berühren. Mit dieser Prämisse können die mengentheoretischen Beziehungen nach folgendem Schema ermittelt werden:

- Vergleiche alle äußeren Polygone $P_{out,i}$ miteinander und überprüfe, ob ein beliebiger Punkt $v_k(P_{out,i})$ innerhalb eines anderen äußeren Polygons liegt. Falls dies nicht der Fall ist, füge dieses Polygon der obersten Ebene einer Baumstruktur hinzu.
- Überprüfe für alle inneren Polygone $P_{in,j}$ ob ein beliebiger Punkt $v_k(P_{in,j})$ innerhalb eines äußeren Polygons $P_{out,i}$ liegt und ordne das innere Polygon entsprechend in der Baumstruktur an
- Wiederhole die Schritte iterativ mit den verbleibenden äußeren und dann inneren Polygonen, bis keine Polygone mehr übrig bleiben

Zur Überprüfung, ob sich ein Punkt innerhalb oder außerhalb eines Polygons befindet, kann eine Methode angewendet werden, die in dieser Arbeit als „Punkt-in-Polygon-Test“ bezeichnet wird. Hierzu wird ein beliebiger Punkt q ausgewählt, von dem ein Strahl mit Richtung r $(1,0)$ ausgesendet wird. Schneidet der Strahl den Polygonzug in gerader Anzahl, so liegt der Punkt q außerhalb des Polygons. Bei ungerader Anzahl an Schnittpunkten liegt der Punkt q innerhalb des Polygons. Darüber hinaus existieren einige Sonderfälle, die es zu beachten gilt (vgl. Abb. 7-7).

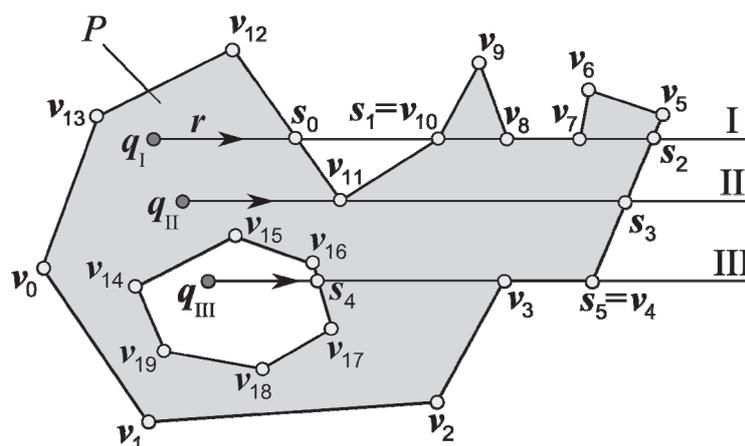


Abb. 7-7: Punkt-in-Polygon-Test

Im Fall I schneidet der Strahl die Kante $\langle v_{11}, v_{12} \rangle$ transversal bei s_0 . Anschließend wird der Eckpunkt v_{10} durchlaufen. Da jede Kante jedoch separat auf Schnittpunkte mit dem Strahl überprüft wird, würde der Schnittpunkt s_1 doppelt gezählt werden, was zu der falschen Schlussfolgerung führen würde, dass der betrachtete Punkt q_I außerhalb von P liegt (gerade Anzahl an Schnittpunkten). Dahingegen stellt im Fall II der Eckpunkt v_{11} kein Problem dar, da dies in diesem Fall das korrekte Ergebnis liefert (ungerade Anzahl an Schnittpunkten). Betrachtet man im Fall I die Kante $\langle v_7, v_8 \rangle$, so liegt diese koinzident zum Strahl, was theoretisch zu unendlich vielen Schnittpunkten führt. Am Ergebnis der Betrachtung würde das Zusammenlegen der Punkte v_7 und v_8 nichts ändern. Im Fall III dagegen würde wiederum das Ergebnis verfälscht werden, wenn die Punkte v_3 und v_4 zusammenfallen würden. Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit folgende Konvention getroffen: Eine Kante eines Polygons wird von einem Strahl transversal geschnitten, wenn ein Endpunkt der Kante oberhalb des Strahls und der andere Endpunkt der Kante auf dem Strahl oder unterhalb des Strahls liegt. Dies führt dazu, dass die Schnittpunkte mit den Kanten $\langle v_2, v_3 \rangle$, $\langle v_3, v_4 \rangle$, $\langle v_7, v_8 \rangle$ und $\langle v_{10}, v_{11} \rangle$

nicht zur Ermittlung der Lage des Punktes q herangezogen werden. Auf diese Weise lässt sich stets aufgrund der Anzahl an Schnittpunkten bestimmen, ob sich ein Punkt innerhalb oder außerhalb eines Polygons befindet.

7.4 Integration der umgesetzten Teilkonzepte

Die in den Abschnitten 5.3 – 5.6 vorgestellten Konzepte zur Analyse, Quantifizierung und Bewertung der für die Bauteilorientierung zu berücksichtigenden Effekte sind in Form von einzelnen Modulen gekapselt und im Optimierungsalgorithmus implementiert. Hierdurch lassen sich gezielt verschiedene Gewichtungen für die Berücksichtigung der einzelnen Effekte einstellen. Da die zugrunde gelegten Konzepte der einzelnen Module bereits im Kapitel 5 erläutert wurden, wird hier nicht gesondert auf die Details der technischen Realisierung eingegangen. Die einzelnen Module sind als Klassentemplates konzipiert und können unabhängig voneinander angesteuert werden. Sofern die entsprechenden Gewichtungsfaktoren gesetzt werden, erfolgt mit Hilfe der Module die Berechnung der einzelnen Gütefaktoren. Damit die Fertigungsplanung an den Konstruktionsprozess angebunden werden kann, lässt sich die entwickelte Applikation zur Optimierung der Bauteilorientierung auch in eine CAD-Umgebung integrieren. Dies wurde beispielhaft für das 3D-CAD-System SolidWorks von Dassault Systèmes umgesetzt. Eine mit Hilfe der SolidWorks-API (VBA) entwickelte Anwenderschnittstelle (siehe Abb. 7-8) zur Einbindung der in C++ programmierten Routinen als DLL-Datei ermöglicht die Anwendung des hier vorgestellten Optimierungsalgorithmus. Eine Datenbankanbindung (MS Access) realisiert dabei die Abfrage verfahrens-, anlagen- sowie materialabhängiger Prozessgrößen. Wesentlicher Vorteil der CAD-Integration ist die Vorhersage der Bauteil- und Prozessqualität während der Konstruktionsphase. Zusätzlich ermöglicht die Einbindung eine Vorschau von Zwischenergebnissen (z. B. Kennzeichnung von Kontaktstellen notwendiger Stützkonstruktionen) und die Darstellung von Optimierungslösungen, so dass durch eine frühzeitige Simulation konstruktive Änderungen zur Bauteiloptimierung vorgenommen werden können.

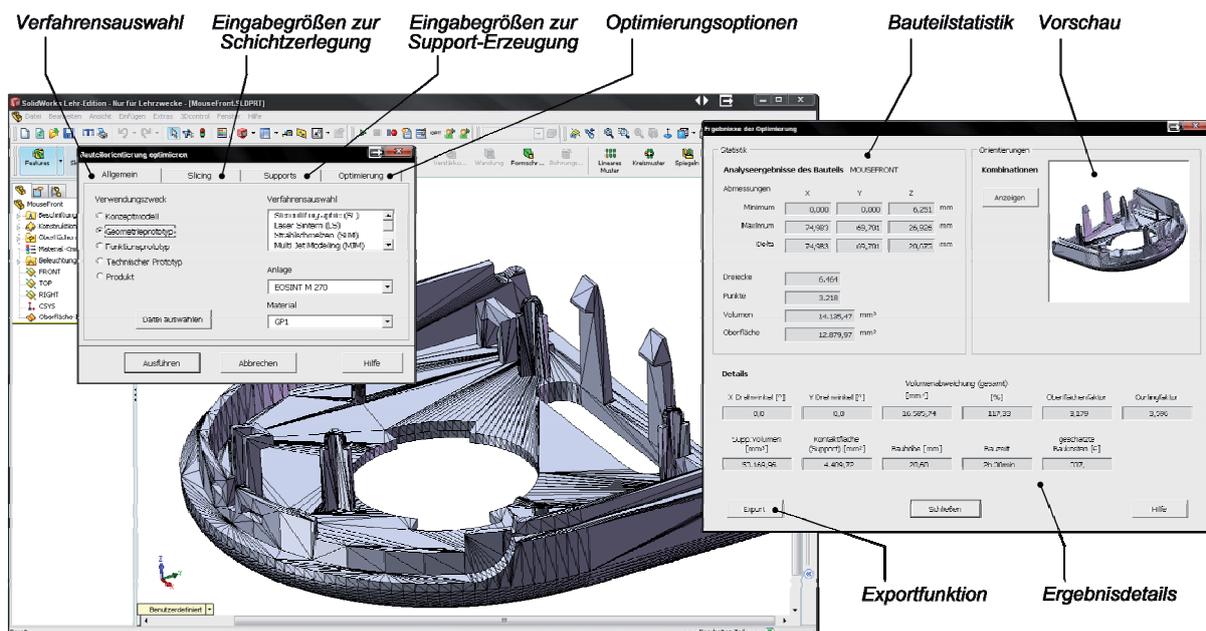


Abb. 7-8: Integration des Optimierungssystems in das CAD-System SolidWorks

8 Validierung und Evaluierung

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz zur Optimierung der Bauteilorientierung, unter Berücksichtigung Einfluss ausübender Effekte, wurde im Rahmen der Umsetzung mit zahlreichen Testobjekten auf Anwendbarkeit und Gültigkeit überprüft. Zur Validierung der einzelnen Module werden in der vorliegenden Arbeit zunächst ausgewählte Bauteile hinsichtlich einzelner Kriterien optimiert und die Ergebnisse dargestellt. Anhand dieser Beispiele erfolgt die formale sowie inhaltliche Überprüfung der Teilkonzepte, indem das erwartete Verhalten mit den Optimierungsergebnissen abgeglichen wird. Da jegliche Formulierung technologischer Zusammenhänge zwischen den hier berücksichtigten Effekten und der Bauteilorientierung in Form von Regeln oder einer geschlossenen Wissensbasis fehlt, basiert der Abgleich auf Erfahrungswerten von zu Rate gezogenen Experten. In einem zweiten Schritt erfolgt eine multikriterielle Optimierung exemplarischer Bauteile entsprechend typischer Anwendungsfelder der Rapid-Technologie. Hierbei handelt es sich um verschiedene Kombinationen von Kriterien, die mit den verschiedenen Verfahrenseigenschaften einhergehen. Dieses Kapitel wird schließlich mit einer Zusammenfassung und Bewertung des Konzepts abgeschlossen.

8.1 Visualisierung und Interpretation der Ergebnisse

Genetische Algorithmen weisen im Allgemeinen ein komplexes Verhalten auf. In zahlreichen Iterationsschritten wird eine Menge zum Teil unterschiedlicher Daten produziert, die eine geordnete Übersicht erschweren. Die in ihren algorithmischen Grundlagen teils einfach strukturierten Teilprozesse bieten aufgrund der Vielzahl von Operationen und zu verarbeitenden Daten keinen Einblick in das Verhalten bzw. die Entwicklung des genetischen Algorithmus. Für sich genommen tragen diese Informationen nur wenig zum Verständnis bei. Erst durch eine Filterung und Auswertung der Datenmenge sowie den Transfer einzelner Teilschritte auf eine höhere Abstraktionsebene wird das Verhalten der Algorithmen transparent und ermöglicht die Interpretation der Ergebnisse ihrer Anwendung. Einen entscheidenden Beitrag hierzu liefert die Visualisierung der Daten. Hierbei unterscheidet man grundsätzlich die Programm-Visualisierung (Darstellung des Aufbaus oder wesentlicher Bausteine) und die Algorithmen-Visualisierung (Vermittlung grundlegender Funktionen und des Ablaufs), deren Methoden auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung gefunden haben. Zur Visualisierung der Ergebnisse wiederum empfiehlt sich sowohl die Darstellung der Datenentwicklung als auch die Ergebnisdarstellung im Kontext des Suchraums. Für die direkte Darstellung bzw. Visualisierung einer Zielfunktion stehen maximal drei Dimensionen zur Verfügung, so dass nur Zielfunktionen mit 2 Variablen vollständig visualisiert werden können. In der vorliegenden Optimierungsaufgabe handelt es sich jedoch um ein höherdimensionales Problem. Damit ist die vollständige grafische Darstellung der aufgeschlüsselten Ergebnislandschaft nicht möglich. Aus diesem Grund werden Ergebnisse einzelner Zielfunktionen oder ihrer gewichteten Summe als Gesamtzielfunktion in Form von 3D-Flächendiagrammen dargestellt. Darüber hinaus

wird jede Ergebnisdarstellung durch 2D-Konturdiagramme ergänzt. Ein Beispiel für eine Bewertung des Suchraums liefert Abb. 8-1, in der dunkelblaue Flächen einen niedrigen Fitnesswert (Score), also Optima, repräsentieren und rot gefärbte Regionen Orientierungen mit einem hohen (schlechten) Fitnesswert kennzeichnen.

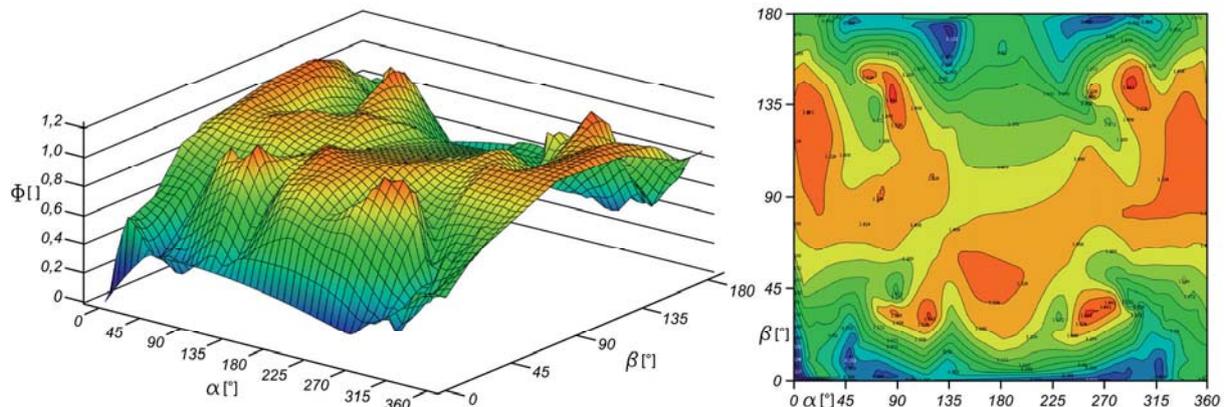


Abb. 8-1: Ergebnisdarstellung als 3D-Flächen- und 2D-Konturdiagramm

Die hier verwendete Ergebnisdarstellung erleichtert die Ermittlung eines globalen Optimums im Suchraum sowie die Zuordnung der Eingangsvariablen α und β , also die zu einer Orientierung zugehörigen Drehwinkel. Zur Flächenerzeugung werden fehlende Punkte interpoliert. Da jedoch in der Regel mehrere tausend Lösungskandidaten des Suchraums analysiert werden und eine großflächige Suchraumabdeckung gewährleistet ist, sind die durch die Interpolation erzeugten Fehler von vernachlässigbarer Größe. Entscheidend ist eine ausreichende Diversität zur qualifizierten Bewertung lokaler Optima.

8.2 Anwendungsbeispiele

Zur Validierung und Veranschaulichung der einzelnen Module werden zunächst nur einzelne Kriterien zur Optimierung der Bauteilorientierung betrachtet. Die praktische Relevanz ergibt sich erst durch die Kombination der einzelnen Module. Daher sind die Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus zunächst ausschließlich hinsichtlich des betrachteten Kriteriums zu bewerten. Es gilt das Optimierungsverhalten des entwickelten Systems für einzelne Kriterien und völlig losgelöst von weiteren Einflussfaktoren zu überprüfen. Am Ende des Abschnitts werden exemplarisch für drei verschiedene Bauteile multikriterielle Optimierungen vorgenommen, die typische Anwendungsfälle widerspiegeln sollen. Hier erfolgt eine ganzheitliche Problembetrachtung unter Berücksichtigung typischer Fertigungsziele, wie z. B. hohe Bauteilqualität und/oder hohe Wirtschaftlichkeit.

8.2.1 Minimierung der Bauhöhe

Eine fundamentale und zugleich häufig notwendige Optimierung bei Anwendungen der Rapid-Technologie stellt die Minimierung der Bauhöhe dar. Insbesondere bei geforderter Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses trägt dieser Optimierungsschritt wesentlich zur Reduzierung der Fertigungskosten bei. Zur Überprüfung der Korrektheit des Optimierungsverhal-

tens wird ein Bauteil „Schnappriegel“ (Abb. 8-2) hinsichtlich der Bauhöhe optimiert. Zur Bestimmung einer Maximalabmessung als Referenzwert wurde der Durchmesser $d(CH)$ der konvexen Hülle ermittelt. Die für jede Orientierung durchgeführte Überprüfung der Bauteilhöhe in einem raumfesten Koordinatensystem mit Hilfe einer achsenorientierten Bounding Box wurde mit diesem Referenzwert abgeglichen, so dass die in der Abbildung dargestellte optimierte Lage gefunden werden konnte. Hierzu wurden über 30 Generationen hinweg mehr als 1900 verschiedene Orientierungen ausgewertet.

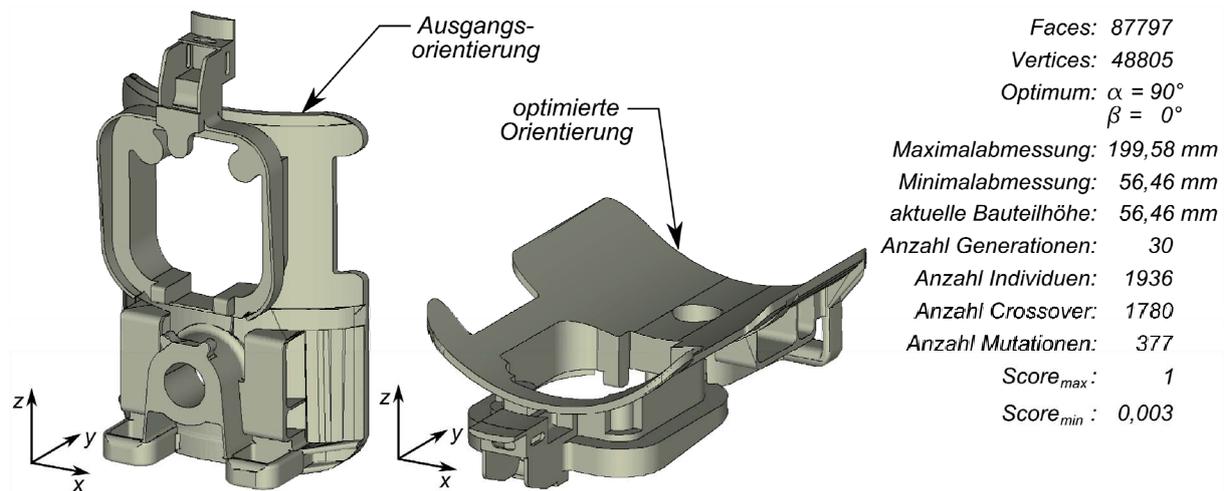


Abb. 8-2: Anwendungsbeispiel „Schnappriegel“

Die Darstellung des bewerteten Suchraums (Abb. 8-3) zeigt eindeutige Optima, die sich durch Drehung des Bauteils von 90° oder 270° um die x-Achse und 0° oder 180° um die y-Achse bezüglich der ursprünglich eingelesenen Orientierung ergeben. Dies deckt sich mit den Erwartungen und konnte ebenfalls mit Hilfe von Gegenprüfungen in einem CAD-System verifiziert werden.

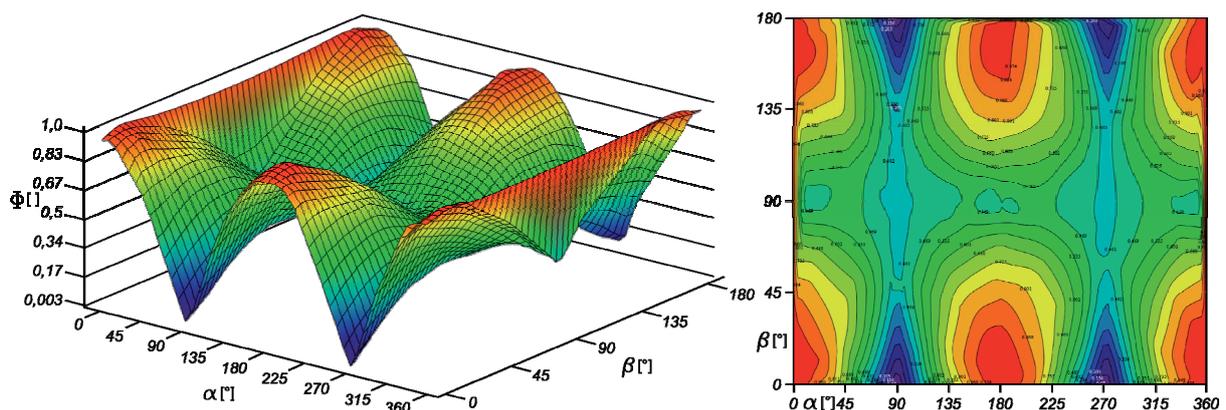


Abb. 8-3: Ergebnisdarstellung „Schnappriegel“

Die Orientierung des Schnappriegels zur Erreichung einer minimalen Bauhöhe gestaltet sich aufgrund der eindeutigen Geometrie als sehr einfach. Anhand dieses Beispiels konnte jedoch sehr gut die Zuverlässigkeit des Algorithmus getestet werden. Zur Bestätigung und als Beweis für die Anwendbarkeit auf komplexere Geometrien wurde ein zweites Testobjekt „Stier“ aus der Spielzeugindustrie optimiert. Die optimierte Orientierung sowie das Konturdiagramm des Lösungsraums zeigt Abb. 8-4. Dem Diagramm kann ein eindeutiges Optimum bei einer

Drehung von ca. 60° um die x-Achse und 75° um die y-Achse bezüglich der Ursprungsorientierung entnommen werden. Die gestrichelte Quaderhülle um das optimierte Bauteil unterstreicht die Qualität des Ergebnisses.

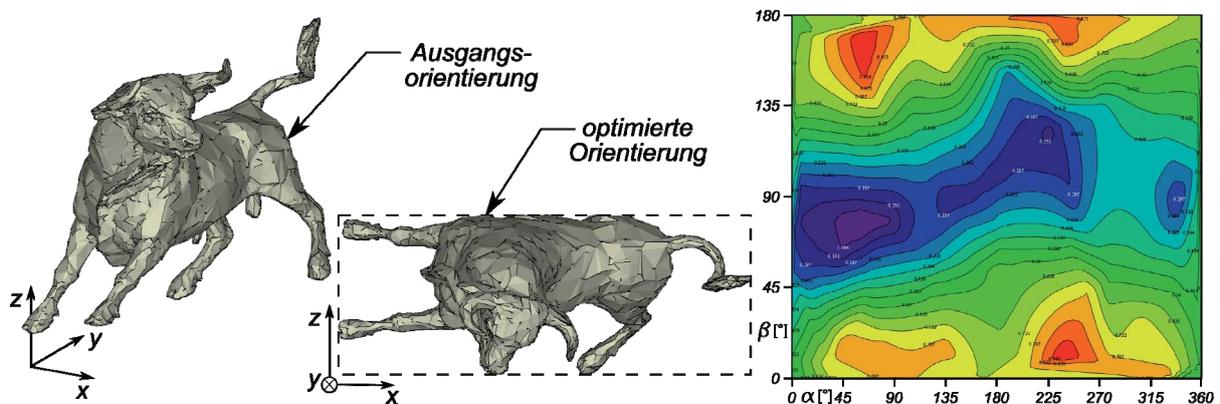


Abb. 8-4: Ergebnisdarstellung „Stier“

8.2.2 Optimierung der Schichtzerlegung

Die Anwendung adaptiver Schichtzerlegung ist nicht integraler Bestandteil des Optimierungsprozesses, kann jedoch ergänzend für vorgegebene Orientierungen angewendet werden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Konzepte bieten zahlreiche Möglichkeiten zur gezielten lokalen Oberflächenverbesserung, so dass durch die Anwendung adaptiver Schichtzerlegung für jede Orientierung die kombinatorische Vielfalt unverhältnismäßig hoch ansteigen würde. Daher empfiehlt sich aus Gründen der Performance die adaptive Schichtzerlegung im Anschluss an den Optimierungsprozess durchzuführen, auch wenn die Integration dennoch technisch aber nicht unbedingt effizient möglich ist. Zur Verdeutlichung der Vorteile gegenüber einer uniformen Schichtzerlegung wird hier exemplarisch ein einfaches Bauteil einerseits mit einheitlicher und andererseits mit adaptiver Schichtstärke zerlegt (Abb. 8-5).

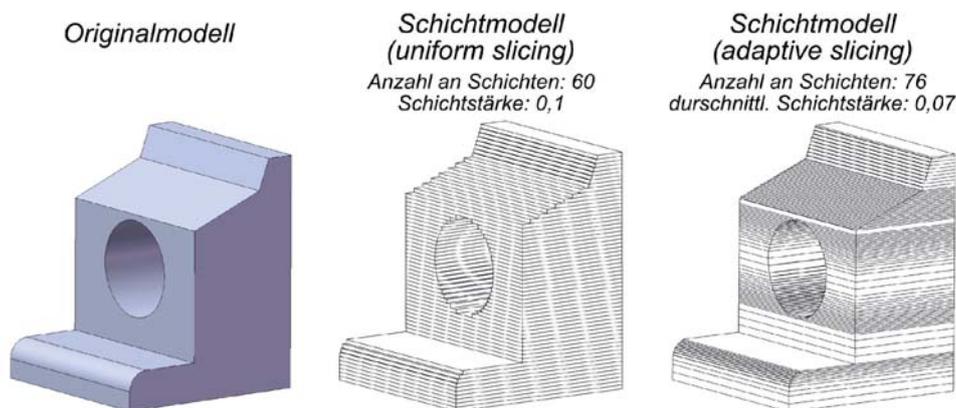


Abb. 8-5: Anwendungsbeispiel „Block“

Insbesondere in den Bauteilbereichen mit zu erwartenden Auswirkungen des Treppenstufeneffekts (Rundung, Bohrung, geneigte Fläche) ist eine lokale Verfeinerung der Schichtstärke deutlich sichtbar, während die Bereiche mit vertikalen Flächen durch dickere Schichten gefertigt werden können. Dies wurde durch die Mindestschichtstärke $t_{min} = 0,02$ mm, den Maxi-

malwert $t_{max} = 0,2$ mm und eine Grenzspitzenhöhe $c_{max} = 0,015$ mm realisiert. Insgesamt führte die adaptive Schichtzerlegung zu einem leichten Anwachsen der Schichtanzahl von 60 auf 76. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die anfängliche Schichtstärke von 0,1 mm auf eine durchschnittliche Schichtstärke von 0,07 mm herabgesetzt wurde. Bei gleichen Genauigkeitsanforderungen sinkt die Schichtanzahl deutlich auf 42. Diese Einsparungen führen zu einer kostengünstigeren Fertigung und ergeben sich häufig für Bauteile, die aus geometrischen Primitiven zusammengesetzt sind. Für Bauteile mit einem hohen Komplexitätsgrad ist in der Regel nicht mit einer Reduzierung der Schichtanzahl zu rechnen. Die Vorteile der adaptiven Schichtzerlegung beschränken sich hierbei auf die gezielte Oberflächenverbesserung durch lokale Verfeinerung. Insgesamt ergibt sich als wesentlicher Vorteil der adaptiven Schichtzerlegung nach dem hier vorgestellten Konzept ein Automatismus des Slicing-Prozesses bei gleichzeitiger Verbesserung der Oberflächengenauigkeit, Maßhaltigkeit und guter Wirtschaftlichkeit.

8.2.3 Minimierung des Treppenstufeneffekts

Ein wesentlicher Schritt zur Optimierung der Oberflächenqualität ist die Minimierung des Treppenstufeneffekts. Zur Validierung der entwickelten Kenngröße zur Beurteilung einer Orientierung hinsichtlich dieses Effekts wird die generative Fertigung einer Pleuelstange mit Hilfe des Strahlschmelzverfahrens (SLM) simuliert. Als Grundlage der flächenbasierten Optimierung dient die Annahme einer Schichtdicke von 0,02 mm und eine Grenzspitzenhöhe $c_{max} = 0,015$ mm. Der genetische Algorithmus führte schließlich zu 3268 bewerteten Individuen aus 43 Generationen. Das ermittelte globale Optimum führt zu einer Orientierung, die der Ausgangsorientierung entspricht (Abb. 8-6). Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Orientierung eine Vielzahl der Flächen parallel oder orthogonal zur Bauebene (x-y-Ebene) ausgerichtet ist. Die horizontal ausgerichteten Befestigungsbohrungen sowie die Bohrung zur Schmierung des Auges fallen dabei kaum ins Gewicht, da fast alle übrigen Flächen hinsichtlich des Treppenstufeneffekts optimal ausgerichtet sind.

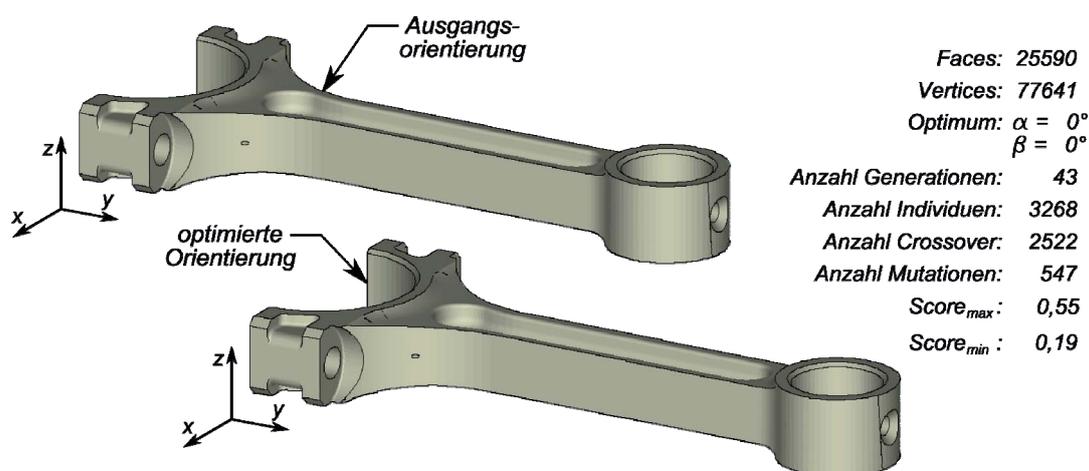


Abb. 8-6: Anwendungsbeispiel „Pleuelstange“

Sollten an die Qualität der Bohrungen höhere Anforderungen notwendig sein, so lassen sich für diese Flächen mit Hilfe des hier entwickelten Konzepts zur heterogenen Flächenattributierung (Abschnitt 5.2) spezielle Grenzwerte für die maximale Spitzenhöhe definieren. Das 2D-

Konturdiagramm der bewerteten Individuen (Abb. 8-7, rechts) zeigt sehr deutlich die ungünstigen Orientierungen, die sich durch Drehung des Bauteils um ca. 30° , 150° , 210° oder 330° um die x-Achse und 45° bzw. 135° um die y-Achse bezüglich der Ursprungsorientierung ergeben. In diesen Fällen ist die Pleuelstange stark geneigt, so dass der Treppenstufeneffekt besonders stark zum Tragen kommt.

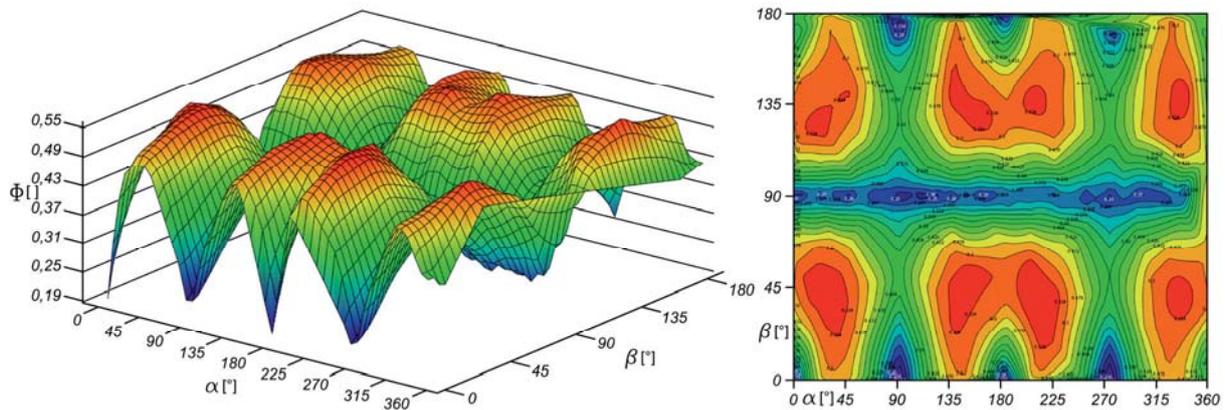


Abb. 8-7: Ergebnisdarstellung „Pleuelstange“

Die Fitnesslandschaft der durchgeführten Optimierung zeigt neben dem oben dargestellten globalen Optimum weitere Optima, jedoch sind diese von etwas geringerer Qualität. Eine Gegenüberstellung der gefundenen Optima mit entsprechendem Fitnesswert zeigt Abb. 8-8.

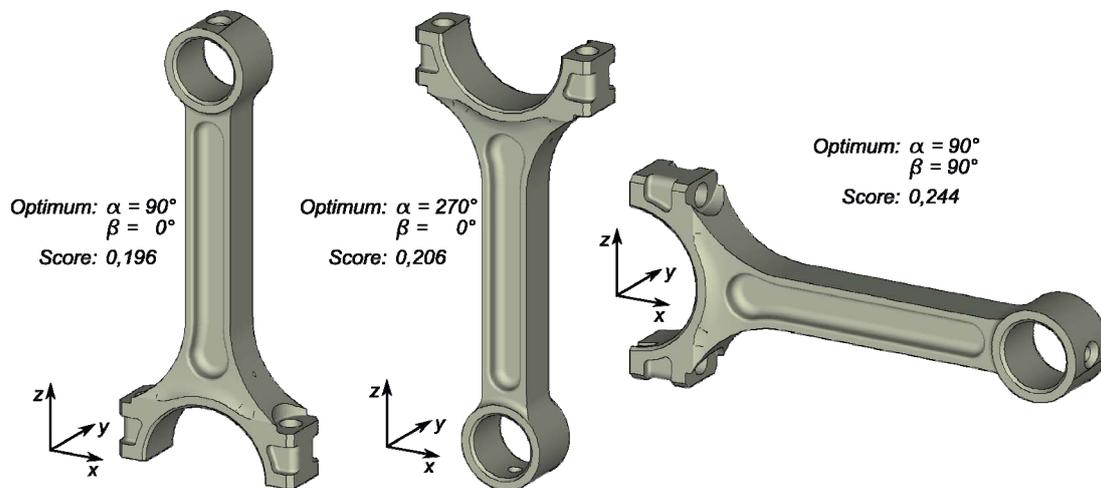


Abb. 8-8: Mögliche Orientierungen für das optimierte Bauteil „Pleuelstange“

8.2.4 Minimierung des Verzugs

In Abschnitt 5.4 wurde ein Konzept zur Quantifizierung potenzieller Einflussfaktoren auf Verzugerscheinungen am Bauteil vorgestellt. Zur Validierung des umgesetzten Algorithmus dient ein Bauteil „Halierung“, das durch orthogonal zueinander stehende Flächen gekennzeichnet ist und dünne Wände sowie Stege aufweist (Abb. 8-9). Betrachtet man das Bauteil in seiner ursprünglichen Lage, so ist insbesondere bei einer Orientierung, die sich durch eine 180° -Drehung um die x-Achse ergeben würde, Verzug am Bauteil aufgrund großer Querschnittsprünge aufeinanderfolgender Schichten zu erwarten.

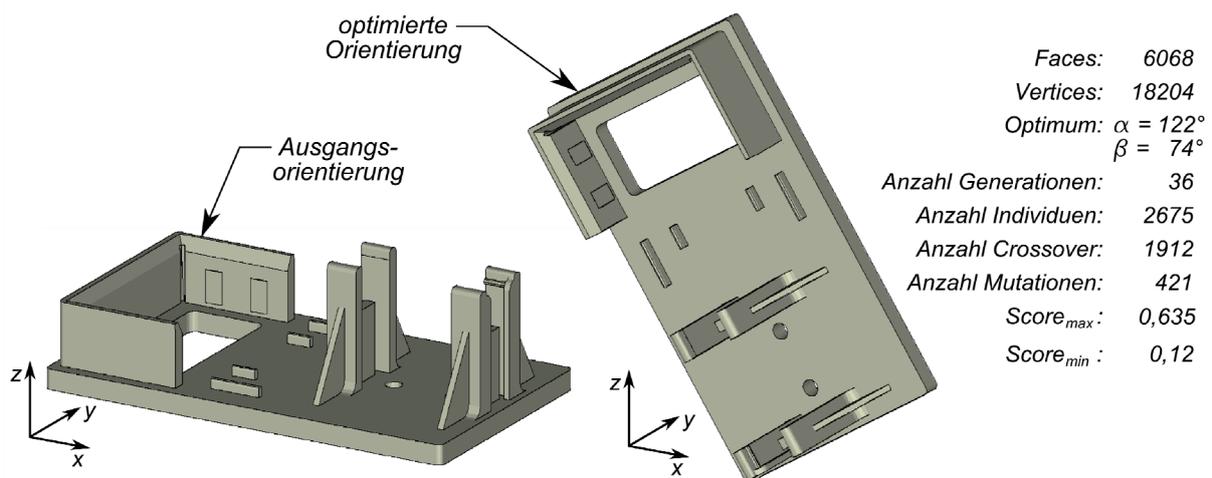


Abb. 8-9: Anwendungsbeispiel „Halterung“

Ein über 36 Generationen hinweg durchgeführter Optimierungsprozess, bei dem etwa 2700 Lösungskandidaten analysiert wurden, führt schließlich zu dem in Abb. 8-10 dargestellten Bewertungsdiagramm. Hier ist deutlich ersichtlich, dass eine geneigte Orientierung zu guten Fitnesswerten führt. Orientierungen, bei denen die Grundfläche der Halterung parallel zur Bauebene steht, führen dagegen zu hohen Fitnesswerten und demzufolge zu einem möglichen Verzug des Bauteils. Während die 180°-Drehung um die x-Achse zu den potenziell hohen Temperaturgradienten führt, liegt die Ursache einer schlechten Bewertung der Ursprungslage (0°- bzw. 360°-Drehung um die x-Achse) in der Größe der Belichtungsfläche der Grundplatte. Hier ist ebenfalls mit Verzug aufgrund des großen Wärmeeintrags zu rechnen. Das Ergebnis deckt sich mit den Erwartungen.

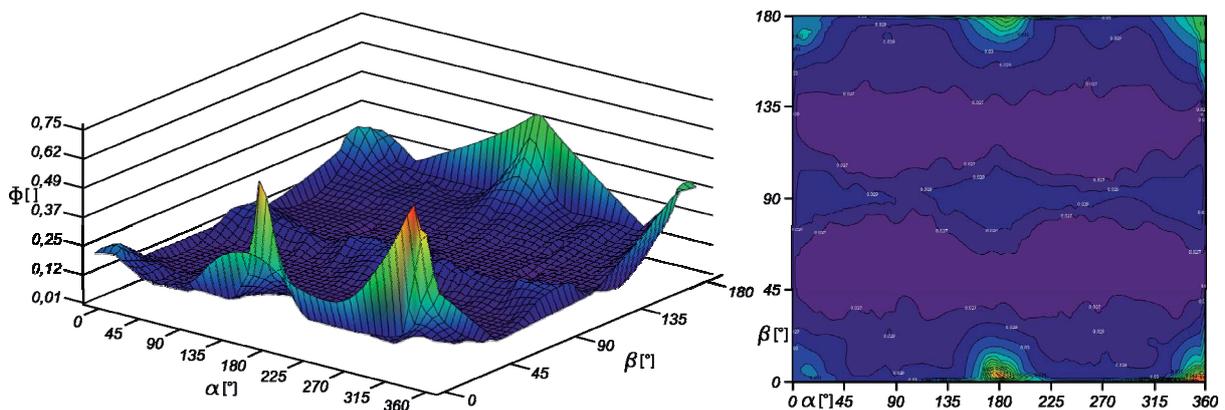


Abb. 8-10: Ergebnisdarstellung „Halterung“

8.2.5 Optimierung der Stützkonstruktionen

8.2.5.1 Minimierung der Kontaktfläche

Bei diesem Beispiel handelt es sich um einen Pfannengriff, der z. B. für Ergonomiestudien mit Hilfe eines polymerisierenden Verfahrens gefertigt werden soll. Dabei ist die Kontaktfläche

angreifender Supports zu minimieren. Da die Wirtschaftlichkeit in diesem Fall nicht Gegenstand der Betrachtung ist, wird ausschließlich der Kontaktflächeninhalt zur Bewertung einer Orientierung hinzugezogen. Der Optimierungsalgorithmus führte von der Ausgangsorientierung (siehe Abb. 8-11) zu einer stark geneigten Ausrichtung, wobei ca. 2100 verschiedene Orientierungen in 33 Generationen ausgewertet wurden.

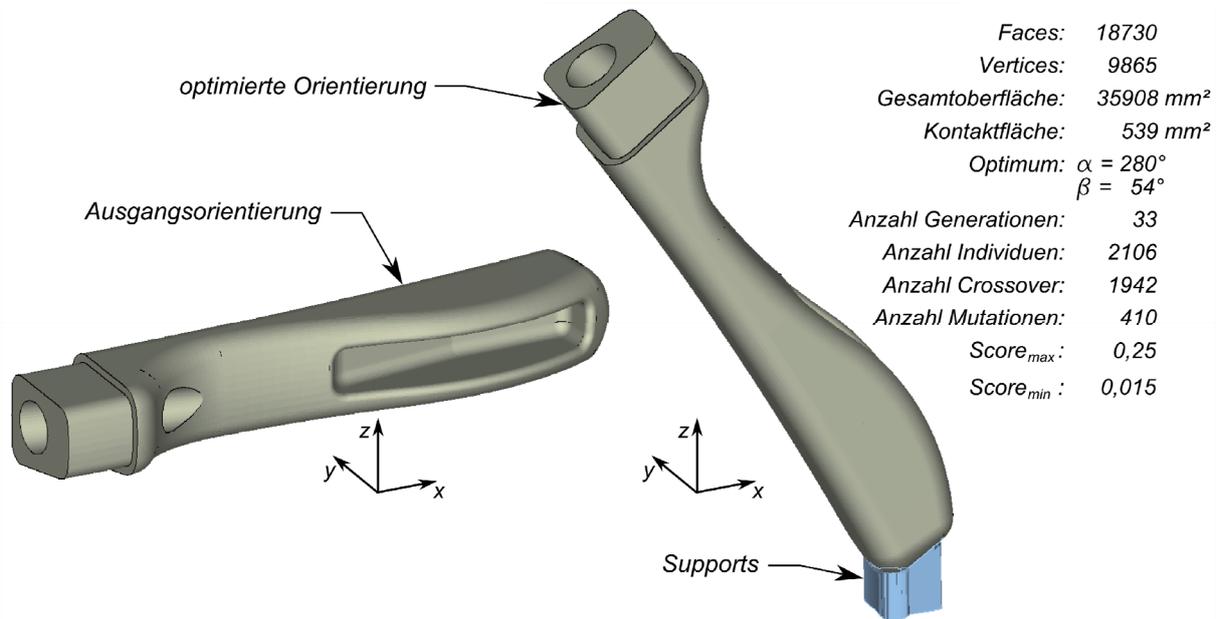


Abb. 8-11: Anwendungsbeispiel „Pfannengriff“

Die Bewertung des vollständigen Suchraums zeigt Abb. 8-12, wobei der schraffierte Bereich im 2D-Konturdiagramm den Bereich optimaler Zustände kennzeichnet. Hieraus ist ersichtlich, dass durch entsprechende Drehungen des Bauteils Orientierungen erlangt werden, bei denen nur eine geringe Anzahl Facetten den eingestellten Grenzwinkel von 42° zur Horizontalen unterschreiten. Des Weiteren zeigen die Diagramme, dass geringe Drehungen aus der Ursprungslage (rote Bereiche) zu sehr schlechten Fitnesswerten führen, da in diesen Fällen das Bauteil eine annähernd horizontale Ausrichtung einnimmt und somit viele Facetten von Stützkonstruktionen betroffen sind. Das Ergebnis ist plausibel und deckt sich mit den erwarteten Orientierungen.

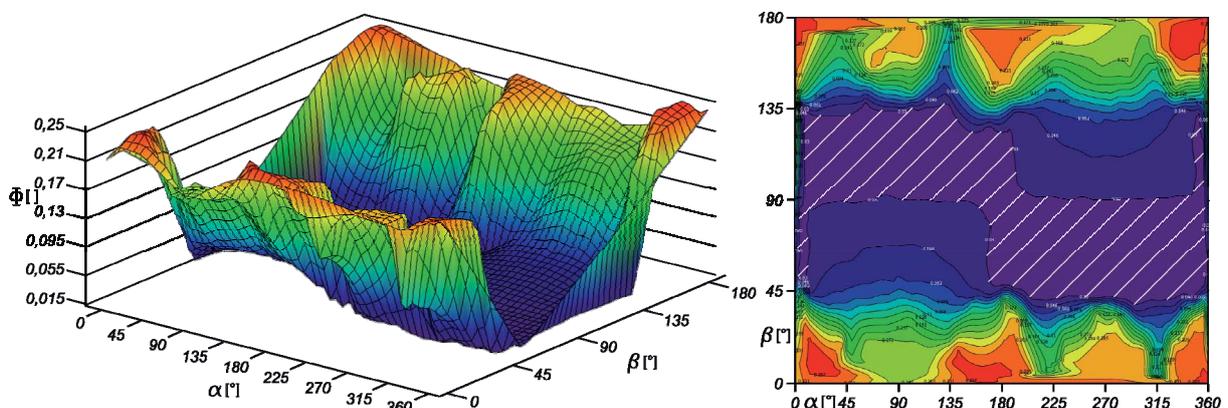


Abb. 8-12: Ergebnisdarstellung „Pfannengriff“

8.2.5.2 Minimierung des Volumens

Für eine Betrachtung des Fertigungsprozesses unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die Minimierung der Materialkosten für Stützstrukturen notwendig. Zur Überprüfung des entwickelten Algorithmus wird das Support-Volumen eines Knieimplantats minimiert (Abb. 8-13). Im Gegensatz zur Minimierung der Kontaktfläche, spielt die räumliche Anordnung hier keine Rolle. Lediglich das Volumen und demzufolge der Materialaufwand für notwendige Stützkonstruktionen ist Gegenstand der Betrachtung.

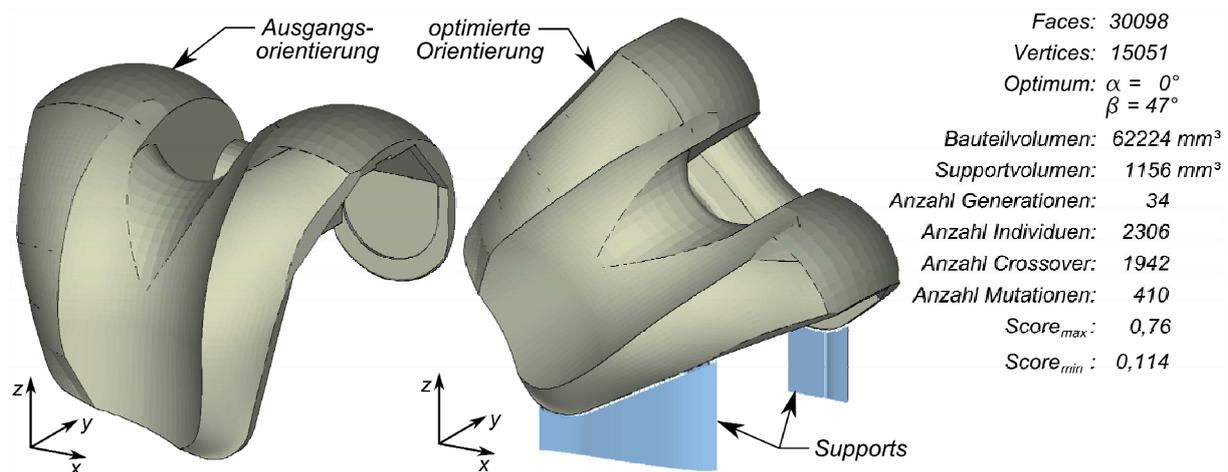


Abb. 8-13: Anwendungsbeispiel „Knieimplantat“

Der Optimierungsvorgang erstreckt sich für das Knieimplantat über 34 Generationen mit insgesamt 2300 ausgewerteten Orientierungen. Die resultierende Fitnesslandschaft (Abb. 8-14) zeigt, dass Drehungen von etwa 45° bzw. 135° um die y-Achse bezüglich der Ausgangsorientierung zu einem Minimum an Support-Volumen führen. Entscheidungsgrundlage für die Notwendigkeit von Stützkonstruktionen ist wiederum ein Grenzwinkel von 42° zur Horizontalen. Die vertikale Unsymmetrie des Konturdiagramms (Abb. 8-14, rechts) folgt unter anderem aus der geometrischen Unsymmetrie des Bauteils. Für dieses Beispiel hat die Optimierung aufgrund der Bauteilgestalt zu optimalen Stützstrukturen geführt. Zum einen konnte ein minimaler Materialaufwand realisiert werden und zum anderen sind die Supports leicht zugänglich und betreffen nur mechanisch nachzubearbeitende Flächen.

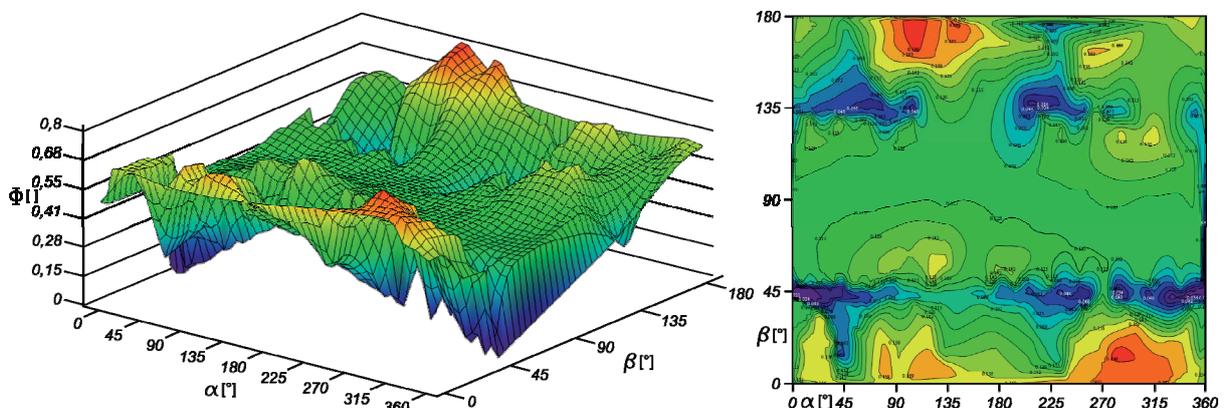


Abb. 8-14: Ergebnisdarstellung „Knieimplantat“

8.2.5.3 Gewährleistung der Entfernbareit

Zur Validierung des Analysemoduls zur Ermittlung von Orientierungen, bei denen die Entfernbareit von Stützkonstruktionen gewährleistet wird, dient ein Kolbengehäuse, das sich aufgrund der vorkommenden Hinterschneidungen (vgl. Abb. 8-15) hierfür gut eignet. Gesucht werden Bauteilorientierungen, bei denen anfallende Supports durch einen ausreichend großen Arbeitsraum für das notwendige Werkzeug entfernt werden können.

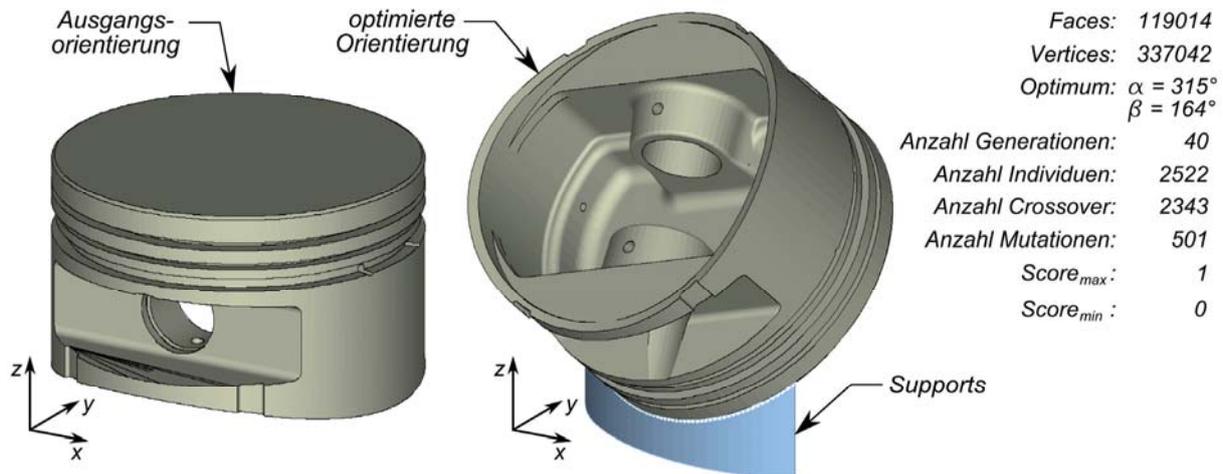


Abb. 8-15: Anwendungsbeispiel „Kolbengehäuse“

Aus seiner ursprünglichen Lage wird das Bauteil derart orientiert, dass aufgrund des Neigungswinkels generell nur wenige Facetten von Stützkonstruktionen betroffen sind. Letztendlich korreliert die Suche nach dem Optimum mit der Minimierung der Kontaktflächen angreifender Stützkonstruktionen. Da der hierfür entwickelte Gütewert gemäß Abschnitt 5.5.3 stets nur den Wert 0 oder 1 annehmen kann und zur Erzeugung des 3D-Flächendiagramms fehlende Punkte interpoliert werden, gestaltet sich die Ergebnisdarstellung des Lösungsraums wie in Abb. 8-16 dargestellt. Wie zu erwarten war, befinden sich die Optima in den Regionen, wo das Bauteil derart angestellt wird, dass bei einem Grenzwinkel zur Horizontalen von 42° keine Stützkonstruktionen an schwer zugänglichen Stellen (z. B. große und kleine Bohrungen) angreifen.

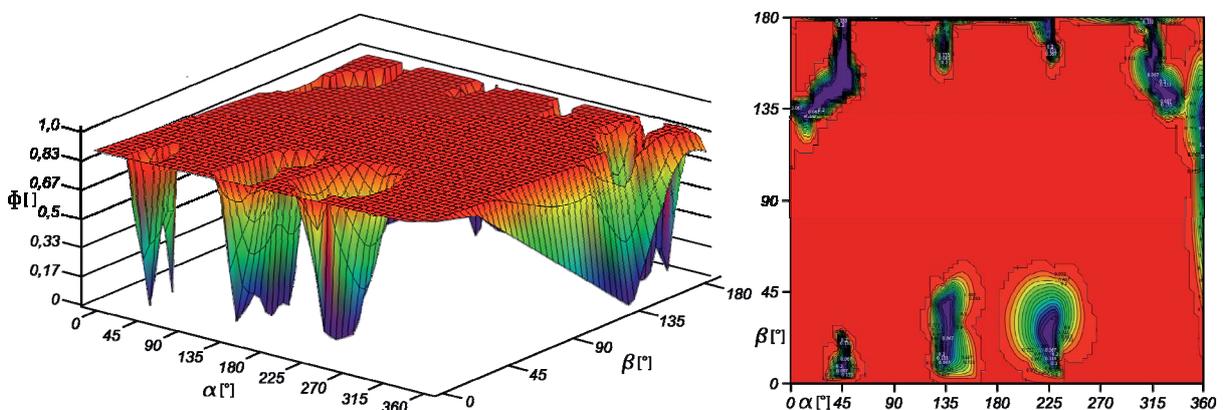


Abb. 8-16: Ergebnisdarstellung „Kolbengehäuse“

8.2.5.4 Gewährleistung der Bauteilstabilität

Zur Überprüfung des Algorithmus wird ein Bauteil „Bremshebel“ analysiert und die Orientierung für das Stereolithographie-Verfahren optimiert, so dass zu jedem Zeitpunkt des Fertigungsprozesses die Stabilität des Bauteils gewährleistet werden kann. Die Betrachtung erfolgt schichtweise ($t = 0,05 \text{ mm}$) unter Vernachlässigung der Stützkraft eventuell angreifender Supports, d. h. ohne Berücksichtigung von Stützkonstruktionen insgesamt, da mit ihrer Hilfe stets ein stabiler Zustand erreicht werden kann. Zudem sind häufig Orientierungen denkbar, die aufgrund des eingestellten Grenzwinkels keine Stützstrukturen benötigen, jedoch nicht zu einem stabilen Zustand führen. Das Resultat des Optimierungsprozesses zeigt nach 30 Generationen und etwa 2100 bewerteten Lösungskandidaten, dass sich ein durchweg stabiler Zustand nur in der in Abb. 8-17 gezeigten Lage einstellt. Alle übrigen Orientierungen würden im Fall der Berücksichtigung weiterer Kriterien (z. B. Verzug) Stützkonstruktionen benötigen.

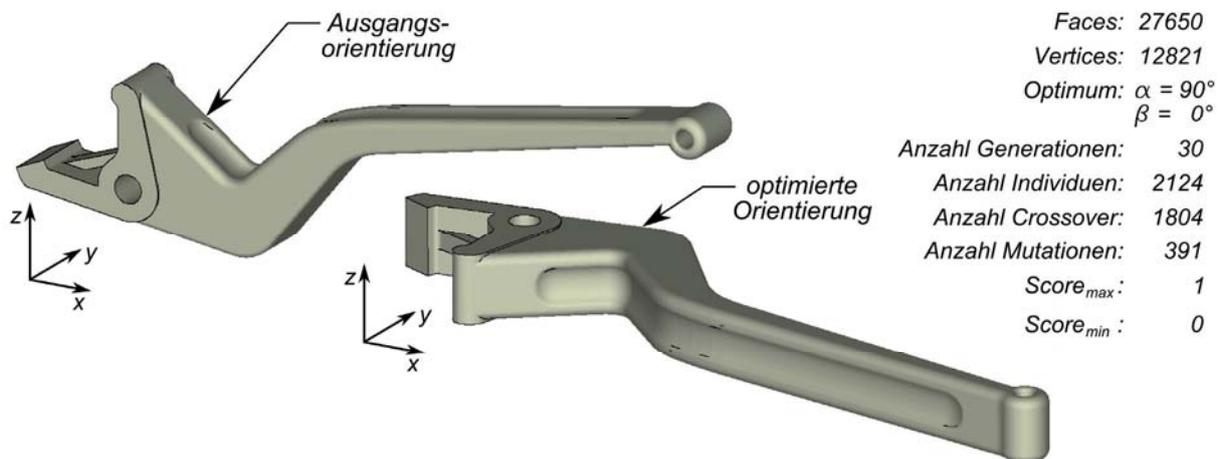


Abb. 8-17: Anwendungsbeispiel „Bremshebel“

Die Bewertung des Suchraums zeigt Abb. 8-18. Hier ist deutlich erkennbar, dass nur Drehungen von 90° bzw. 270° um die x-Achse, bezogen auf die ursprüngliche Orientierung, zu einem guten Fitnesswert führen. Obwohl der hierfür definierte Gütewert (nach Abschnitt 5.5.4) nur den Wert 0 oder 1 annehmen kann, werden in den Diagrammen auch Zwischenwerte angezeigt. Dies ist durch die für die Flächendarstellung notwendige Interpolation fehlender Punkte zu erklären.

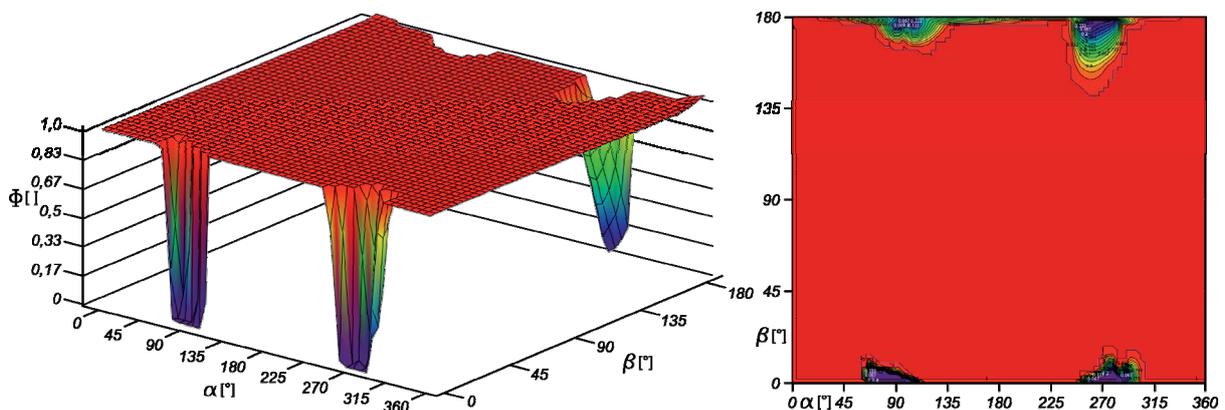


Abb. 8-18: Ergebnisdarstellung „Bremshebel“

Insgesamt deckt sich die Ergebnisdarstellung mit den auf der Basis von Erfahrungswerten erwarteten Orientierungen. Aufgrund der Geometrie des Bremshebels und des daraus resultierenden Schwerpunkts, genügt eine eventuell vermutete leichte Drehung um die y-Achse aus der Ausgangslage nicht für die dauerhafte Gewährleistung der Bauteilstabilität.

8.2.6 Mehrzieloptimierung der Wirtschaftlichkeit

Im Gegensatz zu den bisherigen Anwendungsbeispielen mit unikriterieller Betrachtungsweise werden hier verschiedene Kriterien zusammengefasst. Die zugehörigen Gütekennwerte werden den Anforderungen entsprechend gewichtet und bilden in ihrer Summe die Fitness- bzw. Zielfunktion der Optimierung. Als Testobjekt fungiert ein Ventilgehäuse, das mit Hilfe des Strahlschmelzverfahrens (SLM) gefertigt werden soll. Die verwendete Schichtdicke ist mit 0,02 mm angesetzt. Das Objekt verfügt über eine ausreichende Komplexität mit verschiedenen Bohrungen und unterschiedlichen Flächenarten (vgl. Abb. 8-19). Bei der hier durchgeführten Optimierung wird eine Orientierung gesucht, bei der die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses als optimal einzustufen ist. Dazu werden die Bauzeit, die anfallenden Materialkosten für Stützkonstruktionen sowie der notwendige Nachbearbeitungsaufwand zur Entfernung der Stützstrukturen berücksichtigt. Daher gilt es die Bauhöhe, das Support-Volumen sowie die Kontaktfläche zu minimieren. Die Einzelkosten gemäß Abschnitt 5.6 werden hier nicht im Detail aufgeführt, da sie im Wesentlichen aus der Betrachtung der zuvor genannten Einzelkriterien hervorgehen. Aufgrund der kompakten Bauteilgeometrie haben Drehungen des Bauteils keine nennenswerten Änderungen in der Größe der Querschnittsflächen, so dass in diesem Fall die Kosten C_B der Netto-Bauzeit für das Bauteil (ohne Stützkonstruktionen) prinzipiell als eine Funktion der Bauhöhe angesehen werden können.

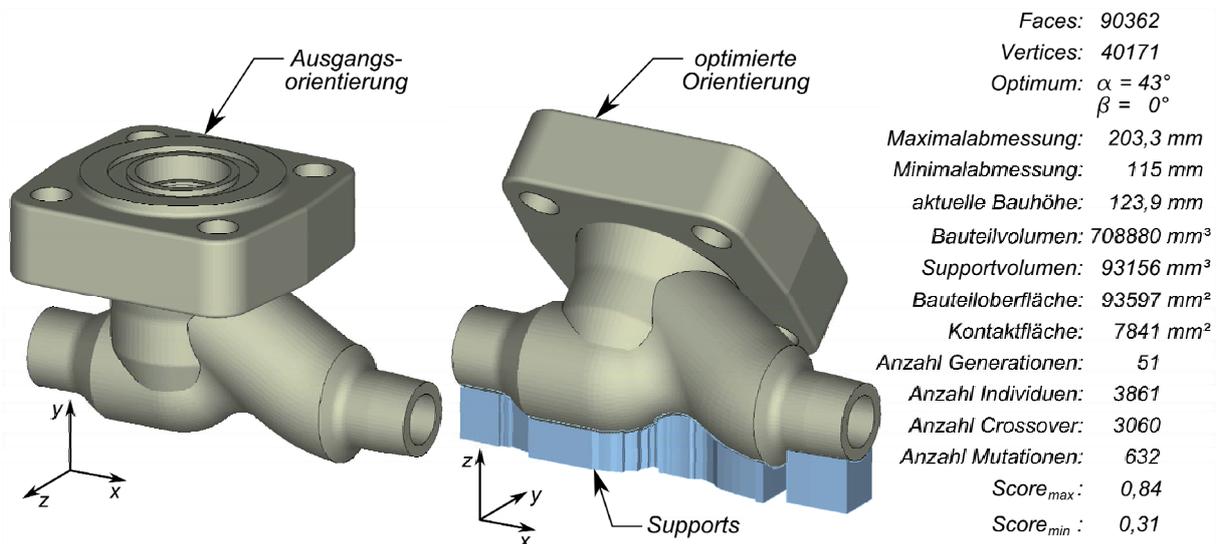


Abb. 8-19: Anwendungsbeispiel „Ventilgehäuse“

Der Optimierungsvorgang erstreckte sich über 51 Generationen, wobei ca. 3900 verschiedene Orientierungen analysiert wurden. Anhand des in Abb. 8-19 dargestellten Resultats ist erkennbar, dass die Verwendung von Stützkonstruktionen unvermeidbar ist, der Aufwand jedoch z. B. durch Drehung des Bauteils um 43° um die x-Achse minimiert werden kann. Auch wenn die Minimalabmessung von 115 mm nicht erreicht werden konnte, so liegt die

aktuelle Bauhöhe von 123,9 mm deutlich näher am Optimum als am Maximalwert von 203,3 mm. Insgesamt stellt das gefundene Optimum eine gute Lösung zur wirtschaftlichen Fertigung des Ventilgehäuses dar. Der gesamte Lösungsraum ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die besten Lösungen durch Drehung des Bauteils um ca. 43° , 137° , 223° oder 317° um die x-Achse bzgl. der ursprünglichen Orientierung ergeben (Abb. 8-20).

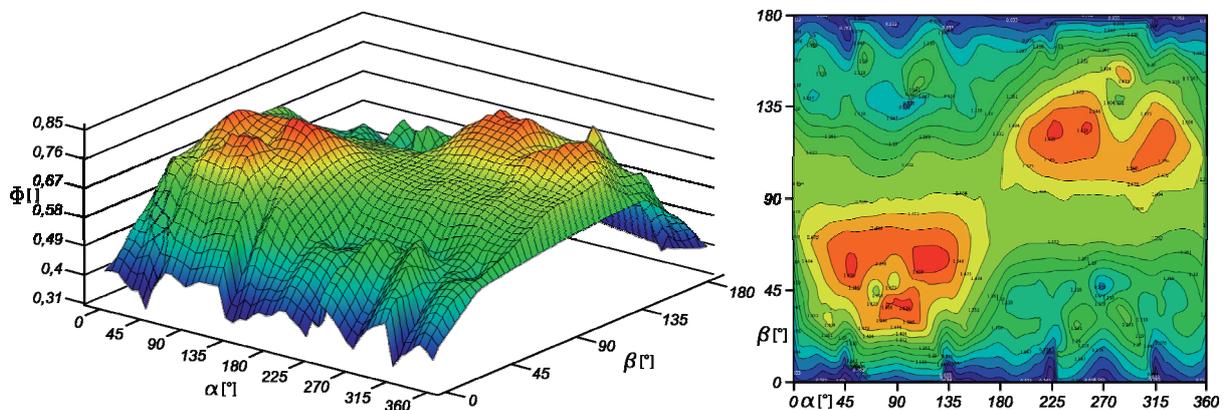


Abb. 8-20: Ergebnisdarstellung „Ventilgehäuse“

Betrachtet man die Teilergebnisse (Abb. 8-21), also die Optimierung des Ventilgehäuses jeweils hinsichtlich der Bauhöhe, der Kontaktfläche bzw. des Support-Volumens, so wird anhand der Fitnesswerte deutlich, dass die Bauhöhe einen entscheidenden Anteil am Gesamtergebnis einnimmt. Der etwas geringere Anteil der Kontaktflächenoptimierung trägt dazu bei, dass Drehungen von 0° , 90° , 180° , 240° oder etwa 295° um die x-Achse zu einem erhöhten Nachbearbeitungsaufwand zur Entfernung von Stützkonstruktionen führen. Die Überlagerung der einzelnen Fitnesslandschaften führt schließlich zu den oben erwähnten Optima, bei denen alle Flächen des nahezu rechteckigen Gehäusegrundkörpers den vordefinierten Grenzwinkel von 42° nicht unterschreiten und somit an diesen Stellen keine Supports benötigen. Dies führt zur Reduzierung der Kontaktfläche sowie des Support-Volumens, wodurch sich die Fertigungskosten insgesamt verringern.

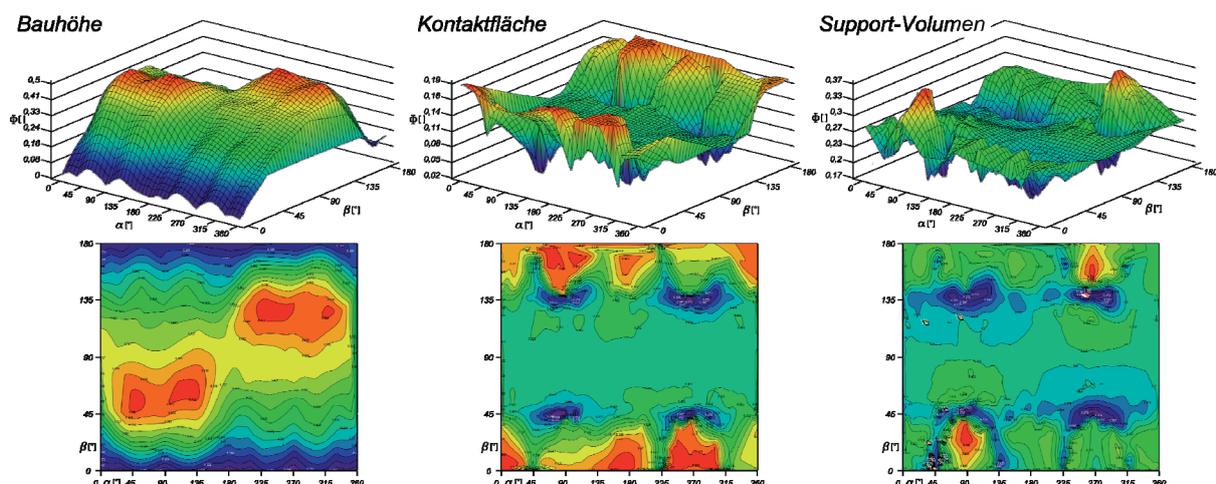


Abb. 8-21: Optimierungsteilergebnisse „Ventilgehäuse“

Die hier gefundenen Orientierungen stellen hinsichtlich der Bauteilqualität keine optimalen Lösungen dar. Da in diesem Beispiel jedoch zunächst ausschließlich die Wirtschaftlichkeit

betrachtet werden sollte, sind die Optimierungsergebnisse zufriedenstellend und halten einem auf Erfahrungswerten basierenden Vergleich stand. Zur Beurteilung der Lösungsqualität liefert Abb. 8-22 weitere Orientierungen des Ventilgehäuses mit jeweils unterschiedlichen Fitnesswerten (Scores). Die linke Orientierung weist einen ähnlich guten Fitnesswert wie das globale Optimum auf, während die mittlere Orientierung aufgrund der zunehmenden Support-Kontaktfläche zu einem schlechteren Ergebnis führt. Die rechte Orientierung erhält eine schlechte Bewertung, da hier jeweils die Kontaktfläche, das Support-Volumen sowie die Bauhöhe zugenommen hat.

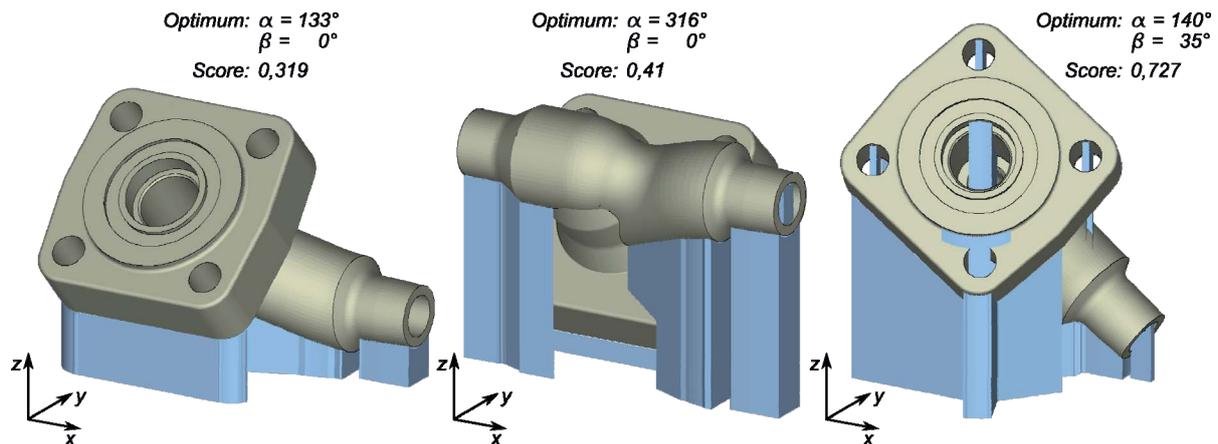


Abb. 8-22: Beispiele für bewertete Orientierungen des Ventilgehäuses

Bei der Betrachtung der hier präsentierten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der zahlreichen Gestaltungsmöglichkeiten der Supports und mit Hilfe eines umfangreichen Erfahrungsschatzes sich stets alternative gute Orientierungen finden lassen. Daher gelten die hier ermittelten Lösungen stets unter der Prämisse einer idealisierten Ausführung von Stützkonstruktionen für Flächen, die einen vordefinierten Grenzwinkel unterschreiten. Dies schließt daher andere Ausführungsarten für Stützstrukturen, wie z. B. Punkt- Linien- oder Web-Supports aus. Im Übrigen müssen die zu vergebenden Gewichtungsfaktoren durch Erfahrungswerte aus der Praxis bestätigt oder möglicherweise angepasst werden.

8.2.7 Mehrzieloptimierung der Bauteilqualität

Neben der Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses steht in den meisten Fällen die Bauteilqualität im Fokus der Prozessvorbereitung. Die bisher aufgezeigten Anwendungsbeispiele haben gezeigt, dass die einzelnen Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität gut erfasst und zur Bewertung einer Orientierung herangezogen werden konnten. Nun gilt es diese Gütefaktoren zu kombinieren, um eine Gesamtaussage zur Bewertung der Bauteilqualität unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren zu erhalten. Zur Validierung der Algorithmen wird hier die Orientierung des Konzeptmodells eines Kfz-Seitenspiegels optimiert (Abb. 8-23). Das mit dem Stereolithographie-Verfahren (SLA) herzustellende Bauteil wird mit 0,03 mm dicken Schichten aufgebaut und soll eine gute Oberflächenqualität aufweisen. Die einzustellende Grenzspitzenhöhe c_{max} beträgt dabei 0,025 mm. Das Ziel der Optimierung ist daher die Minimierung des Treppenstufeneffekts sowie der Support-Kontaktfläche. Aufgrund der gekrümmten Oberflächen und der dünnwandigen Geometrie des Bauteils ist hier nicht mit einem Verzug des Bauteils zu rechnen. Daher findet dieser Aspekt in diesem Beispiel keine Berücksichtigung.

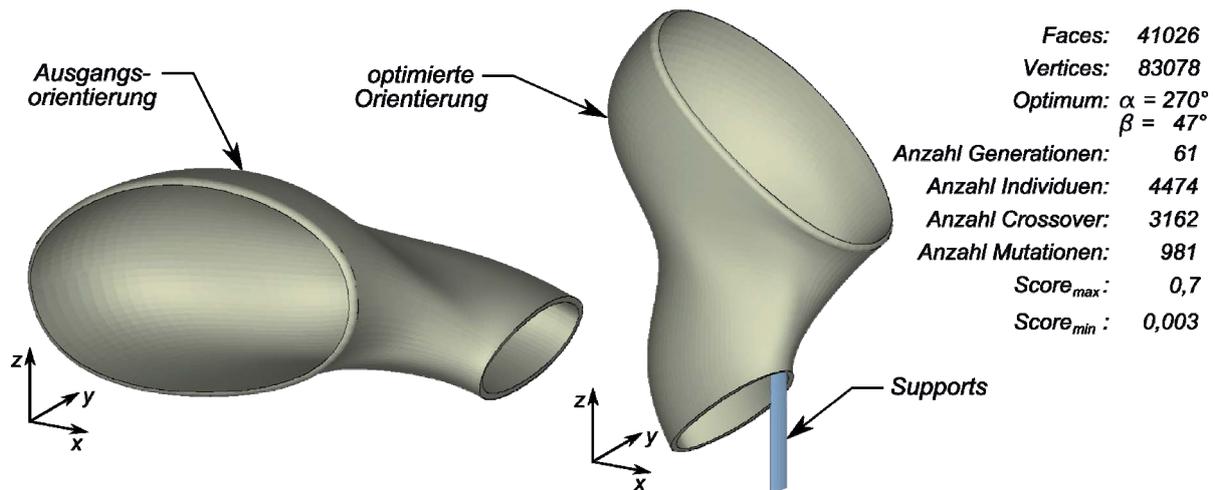


Abb. 8-23: Anwendungsbeispiel „Seitenspiegel“

Im gesamten Optimierungsprozess wurden im Verlauf von 61 Generationen ca. 4500 verschiedene Orientierungen analysiert. Das gefundene globale Optimum stellt sich durch Drehung des Bauteils von 270° um die x-Achse und 47° um die y-Achse ein. In dieser Orientierung beschränkt sich die Support-Kontaktfläche auf ein Minimum. Eine Analyse der Ergebnislandschaft (Abb. 8-24) zeigt, dass sich im Verlauf der Optimierung zwei deutliche Bereiche mit guten Fitnesswerten eingestellt haben. Dies betrifft zum einen die Winkelkombinationen $\alpha \approx 80^\circ$ - 140° / $\beta \approx 115^\circ$ - 165° und zum anderen $\alpha \approx 260^\circ$ - 320° / $\beta \approx 20^\circ$ - 70° .

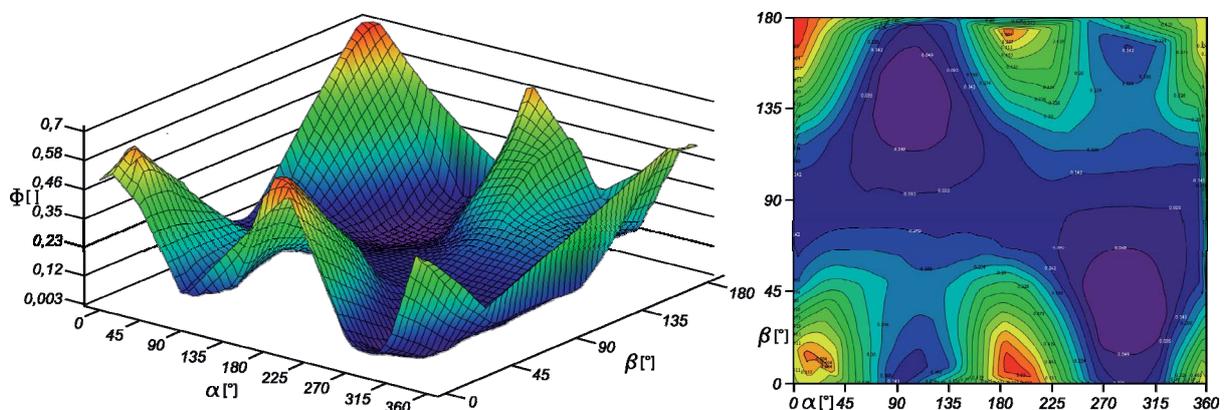


Abb. 8-24: Ergebnisdarstellung „Seitenspiegel“

Eine genauere Betrachtung der beiden optimierten Größen *Treppenstufeneffekt* und *Support-Kontaktfläche* verdeutlicht die Korrelation untereinander (Abb. 8-25). Je spitzer der Neigungswinkel zwischen den Facetten und der Horizontalen, desto stärker wirkt sich der Treppenstufeneffekt aus, was zu einer schlechten Oberflächenqualität führt. Gleichzeitig erfordern Facetten mit solchen Neigungswinkeln Stützkonstruktionen, was ein Ansteigen der Support-Kontaktfläche zur Folge hat. Daher verwundert es kaum, dass das Gesamtergebnis und die beiden Teilergebnisse eine derart große Ähnlichkeit aufweisen. Dies ist jedoch auch wieder darauf zurückzuführen, dass in dieser Arbeit die Ausführung von Stützkonstruktionen auf einer strikten Entscheidungsregel basiert und nicht auf Benutzereingriffe. Sollten zukünftig mehr Informationen für einen regelbasierten Support-Entwurf ohne Grenzwinkelkonzept vorliegen, so würden die Ergebnislandschaften der Einzelkriterien mehr voneinander abweichen.

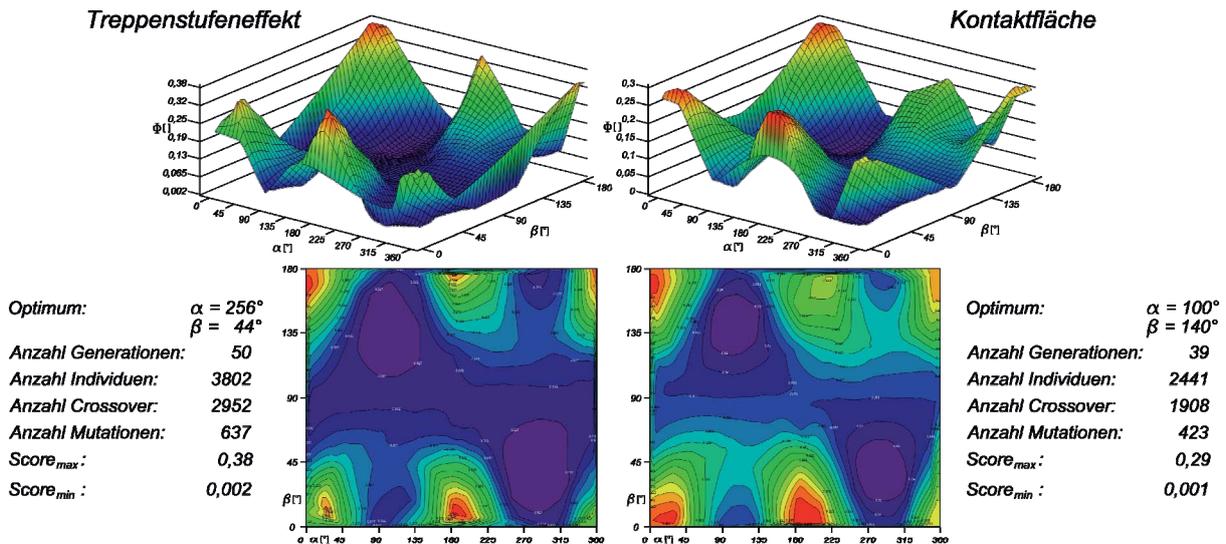


Abb. 8-25: Optimierungsteilerggebnisse „Seitenspiegel“

Der Fokus in diesem Anwendungsbeispiel lag auf der Optimierung der Oberflächenqualität. Daher weisen die gefundenen Lösungen gute Orientierungen hinsichtlich der Bauteilqualität, jedoch nicht hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit auf. Zur Bewertung des globalen Optimums zeigt Abb. 8-26 weitere bewertete Lösungskandidaten. Die dargestellten Orientierungen verzeichnen von links nach rechts eine Zunahme des Treppenstufeneffekts aufgrund einer flacheren Ausrichtung sowie, damit einhergehend, eine Vergrößerung der Kontaktfläche. Die entwickelten Algorithmen zur Bewertung der Bauteilqualität führen insgesamt zu guten Ergebnissen, die sich mit Erfahrungswerten decken.

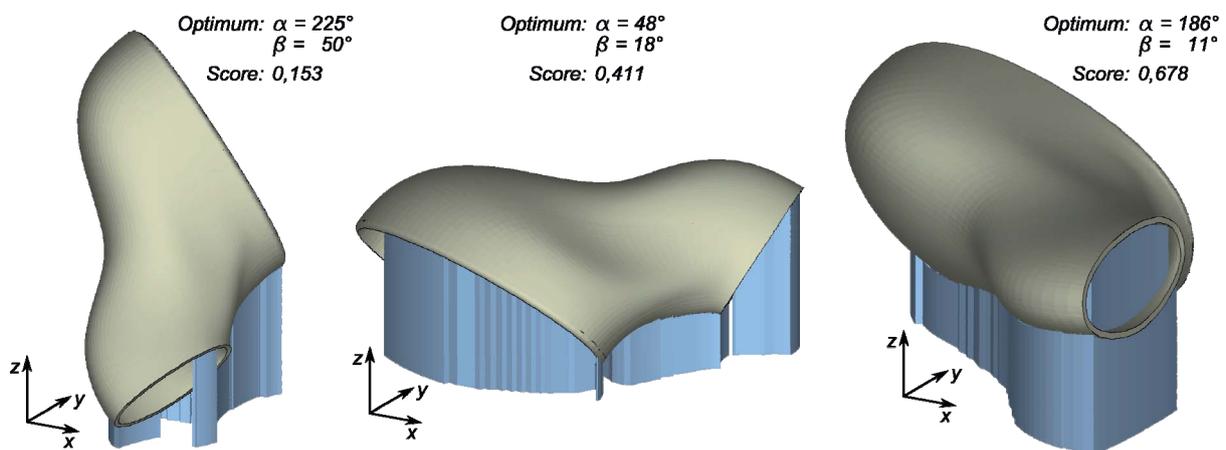


Abb. 8-26: Beispiele für bewertete Orientierungen des Seitenspiegels

8.2.8 Mehrzieloptimierung konträrer Fertigungsziele

Im Gegensatz zu den Anwendungsbeispielen der vorangegangenen Abschnitte kann es vorkommen, dass konträre Fertigungsziele angesetzt werden müssen. In der Regel führen die Optimierungen eines Bauteils hinsichtlich der Bauteilqualität und der Wirtschaftlichkeit zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, so dass gegebenenfalls eine Kompromisslösung gefunden werden muss. Die Gewichtung zwischen Qualität und Wirtschaftlichkeit muss jedoch

stets von Fall zu Fall neu entschieden werden, so dass eine allgemeingültige Verteilung der Gewichtungsfaktoren nicht sehr sinnvoll erscheint. Um jedoch das Optimierungsmodell hinsichtlich dieser beiden konträren Ziele zu validieren, wird im Folgenden die Orientierung für das Bauteil „Ventilgehäuse“ aus Abschnitt 8.2.6 erneut optimiert (Abb. 8-27). Insbesondere die Komplexität der Geometrie lässt kaum die Festlegung einer geeigneten Orientierung ohne umfangreiches Erfahrungswissen zu. Für diesen Optimierungsprozess erhalten die Fertigungsziele *Qualität* und *Wirtschaftlichkeit* gleichwertige Gewichtungsanteile. Das Bauteil wird wiederum mit Hilfe des Strahlschmelzverfahrens mit 0,02 mm Schichtdicken gefertigt. Die Grenzspitzenhöhe c_{max} beträgt 0,016 mm.

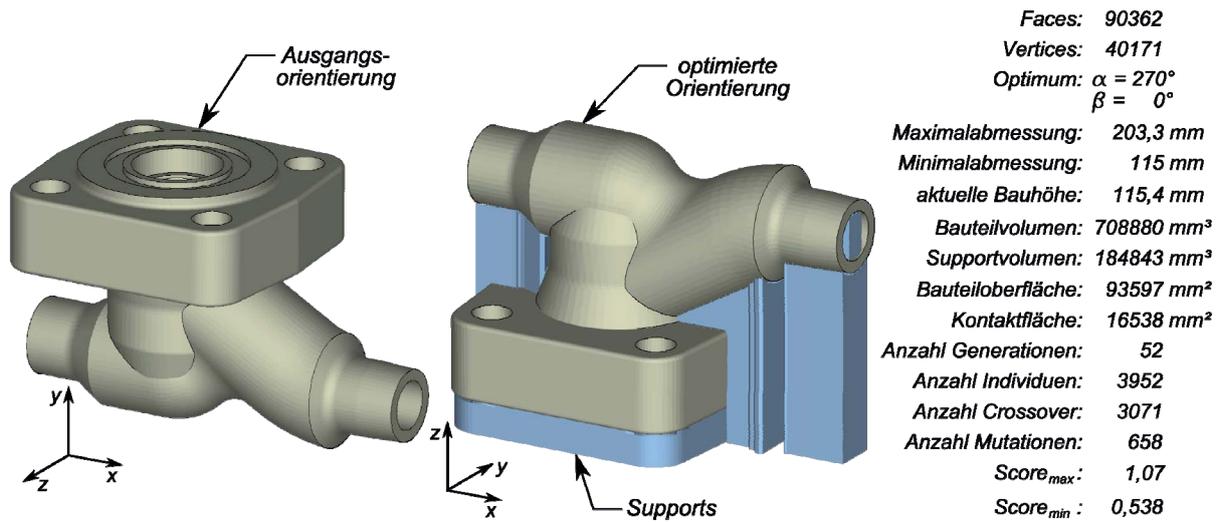


Abb. 8-27: Erweitertes Anwendungsbeispiel „Ventilgehäuse“

Die beste Orientierung, die mit Hilfe des Optimierungssystems gefunden werden konnte, besitzt die Winkelkombination $\alpha = 270^\circ/\beta = 0^\circ$. Auffällig ist zunächst der relativ hohe Aufwand an Stützstrukturen, die zum Teil schwierig zu entfernen sind. Im Gegensatz dazu besitzt der rechteckige Grundkörper des Ventilgehäuses eine sehr gute Oberflächenqualität, da alle Flächen orthogonal oder parallel zur Bauebene ausgerichtet sind. Die Fitnesslandschaft der multikriteriellen Optimierung (Abb. 8-28) zeigt, dass Drehungen um die x-Achse (in der ursprünglichen Orientierung) generell zu guten Kompromisslösungen führen.

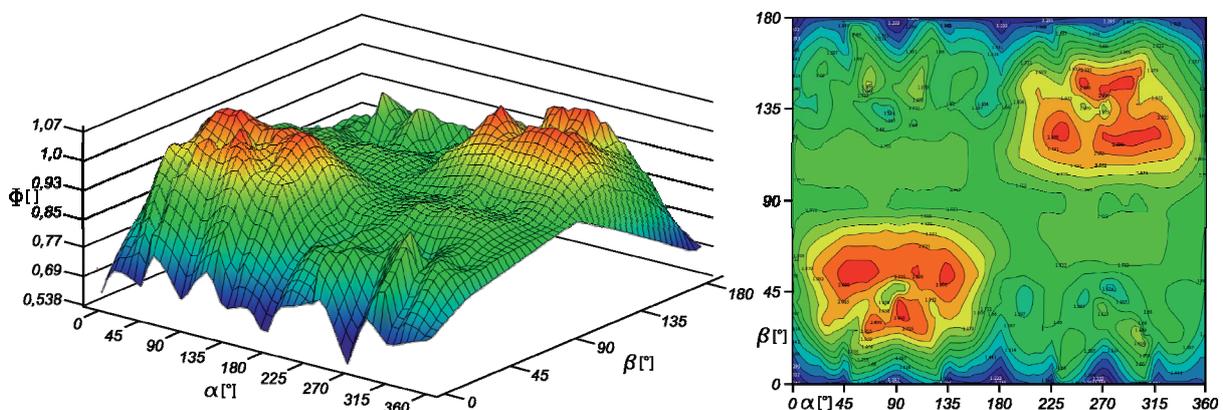


Abb. 8-28: Erweiterte Ergebnisdarstellung „Ventilgehäuse“

Drehungen um die y -Achse (Ausnahme: $\beta = 180^\circ$) resultieren dagegen in schlechten Bewertungen. Dies ist dadurch zu erklären, dass auf der einen Seite die Bauhöhe zunimmt und auf der anderen Seite die Rohrabschnitte für den Einlass bzw. Auslass des Ventils größtenteils in einer zur Bauebene parallelen Ebene liegen. Drehungen um die y -Achse führen zur vertikalen Neigung dieser Rohrabschnitte und somit zu einer Zunahme des Treppenstufeneffekts. Die Ausnahme bei unikriterieller Betrachtung des Treppenstufeneffekts bildet die Drehung von 90° um die y -Achse, da hier die Rohrflächen senkrecht zur Bauebene stehen. Diese Drehung führt jedoch auch zu einer Maximierung der Bauhöhe, wodurch sich demzufolge insgesamt eine durchschnittliche Bewertung ergibt. Die detaillierte Aufschlüsselung der Ergebnislandschaft durch Betrachtung der Teilergebnisse (Abb. 8-29) zeigt, dass die unikriteriellen Optimierungen insgesamt zu sehr unterschiedlichen Ergebnislandschaften führen. Anhand der Einzelfitnesswerte lässt sich erkennen, dass die Größen *Bauhöhe* sowie *Treppenstufeneffekt* den größten Anteil an der Gesamtfunktion einnehmen. Da für das Ventilgehäuse kein nennenswerter Verzug zu erwarten ist, nimmt dementsprechend das Kriterium *Verzug* einen sehr geringen Anteil ein. Insgesamt ist eine große Ähnlichkeit zwischen dem Gesamtergebnis und dem Teilergebnis *Bauhöhe* zu verzeichnen.

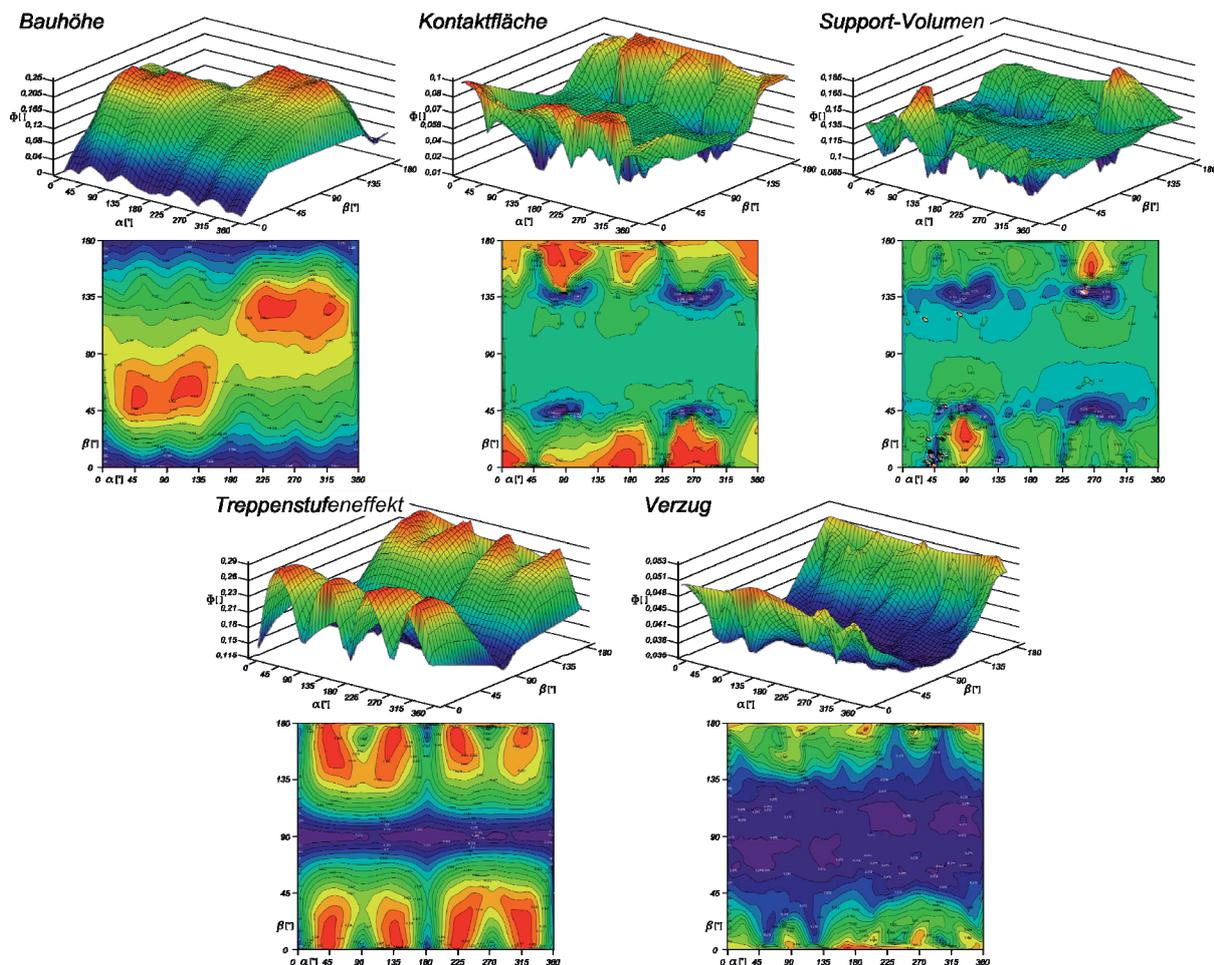


Abb. 8-29: Erweiterte Optimierungsteilergebnisse „Ventilgehäuse“

Zur Bewertung der ganzheitlichen Optimierung des Ventilgehäuses zeigt Abb. 8-30 einige unterschiedliche Orientierungen. Die Fitnesswerte (Score) geben Aufschluss über die Qualität bzw. Bewertung der Orientierung. Von links nach rechts ist jeweils eine Verschlechterung der

Orientierung durch Zunahme der Bauteilhöhe, des Treppenstufeneffekts, der Support-Kontaktfläche sowie des Support-Volumens zu verzeichnen.

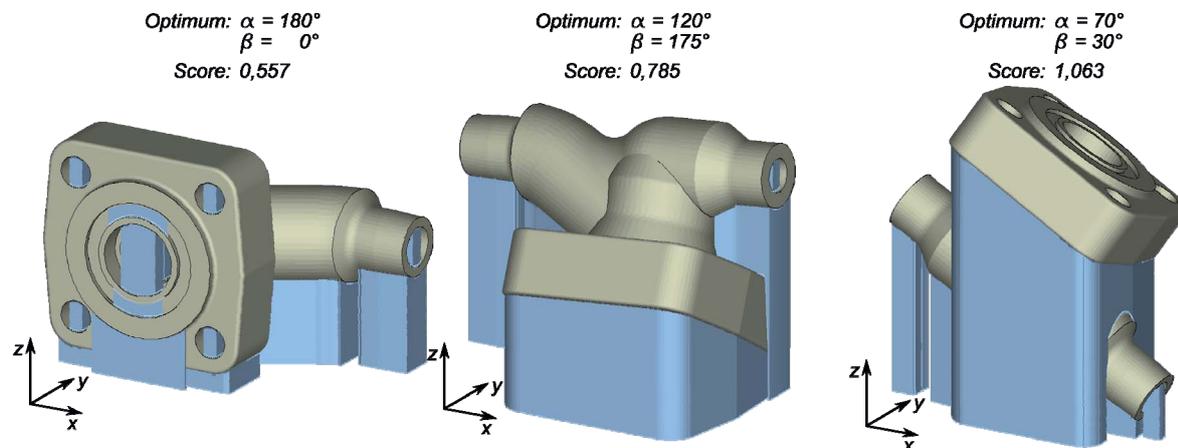


Abb. 8-30: Beispiele für ganzheitlich bewertete Orientierungen des Ventilgehäuses

Das hier aufgeführte Anwendungsbeispiel verdeutlicht die Problematik der zielorientierten Auswahl einer geeigneten Bauteilorientierung. Auch wenn mit Hilfe des entwickelten Optimierungsmodells gute Kompromisslösungen gefunden werden konnten, so scheint doch insbesondere bei konträren Fertigungszielen die Festlegung von Schwerpunkten ratsam. Die genaue Verteilung der Gewichtung wird daher, wie zuvor vermutet, abhängig vom Anwendungsfall zu treffen sein.

8.3 Zusammenfassung und Bewertung des Konzepts

8.3.1 Bewertung der Algorithmen

Die im Abschnitt 8.2 aufgezeigten Anwendungsbeispiele haben gezeigt, dass mit den in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen zuverlässige Ergebnisse erreicht werden können. Da eine in Form von Regeln und Formeln aufgebaute Wissensbasis zur Beschreibung der in dieser Arbeit betrachteten Effekte bis dato fehlt, konnten die entwickelten Algorithmen lediglich mit vorhandenen Erfahrungswerten abgeglichen werden. Zur quantitativen Beurteilung der Qualität der Algorithmen müssten die Simulationsergebnisse durch entsprechende Fertigungstestläufe in der Praxis mit den verwendeten Anwendungsbeispielen abgesichert werden. Dies war jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit. Während die Anwendbarkeit der Algorithmen zur Bewertung von Orientierungen hinsichtlich frei kombinierbarer Gütefaktoren bestätigt werden konnte, gilt es auf die derzeit noch vorhandenen Einschränkungen hinzuweisen. So werden Kennwerte verwendet, die rein probabilistischer Natur sind. Dies betrifft das kritische Flächenverhältnis v_{crit} und die Verhältniszahl η_{crit} zur Abschätzung von Verzugserscheinungen an einem Bauteil. Diese Kennwerte sind durch praktische Versuche zu ermitteln und gegebenenfalls anzupassen. Eine weitere Einschränkung betrifft die Idealisierung der angesetzten Stützstrukturen. Aufgrund der nahezu unbeschränkten Gestaltungsfreiheit der Stützkonstruktionen werden in diesem Optimierungsmodell ausschließlich Blocksupports verwendet. Die zahlreichen Variations- und Kombinationsmöglichkeiten der Ausführungsarten lassen anson-

sten keinen Automatismus ohne benutzerdefinierten Eingriff zu. Dem gegenüber steht die uneingeschränkte Anwendung der Algorithmen auf beliebige Geometrien. Zahlreiche Testläufe mit Objekten unterschiedlichster Komplexität konnten diesbezüglich die Allgemeingültigkeit der Algorithmen bestätigen. Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt darin, dass die hier entwickelten Algorithmen nicht auf bestimmte generative Verfahren beschränkt sind. Die Anwendbarkeit wird lediglich durch verfahrensspezifische Parameter, die in der integrierten Datenbank abgelegt sind, bestimmt. Die freie Wahl der Gütefaktoren zur Festlegung unterschiedlicher Fertigungsziele berücksichtigt zudem die Anwendbarkeit auf beliebige Prototypenarten (gegebenenfalls auch mit Endproduktcharakter).

8.3.2 Bewertung der Optimierungsparameter

Genetische Algorithmen zeichnen sich generell durch eine Vielzahl von Einstellparametern aus. Neben der sinnvollen Repräsentationsform (Codierung) der Lösungskandidaten betrifft dies überwiegend die Auswahl der richtigen Populationsgröße, die geeignete Kombination genetischer Operatoren, den Selektionsmechanismus sowie die Bewertung der Zielfunktionswerte. Während diese untereinander abhängigen Einstellparameter einerseits eine hohe Anpassbarkeit des Algorithmus an das vorliegende Optimierungsproblem ermöglichen, so können sie andererseits bei fehlerhafter Wahl oder Kombination schnell zu einer Instabilität hinsichtlich evolutionärer Konvergenz und Diversität führen. Demzufolge liegt die Schwierigkeit eines GA-Entwurfs in der Parametereinstellung. Jede Veränderung eines Parameters führt in der Regel wesentliche Auswirkungen mit sich. Man sollte sich stets vor Augen halten, dass die Wahl der problemspezifischen Einstellparameter auf empirischen Untersuchungen basiert und die Optimierungsqualität von heuristischer Natur ist. Daher wurden auch im Rahmen dieser Arbeit wissenschaftlich belastbare Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Einstellparameter durchgeführt. Dies schließt alternative Selektionsmechanismen, die Verwendung von Parallelpopulationen, unterschiedliche Populationsgrößen, verschiedene Mutations- und Rekombinationsraten sowie die Variation der Konvergenzkriterien ein. Besonderes Augenmerk galt der Variation der Populationsgröße sowie der Konvergenzkriterien, so dass auch unter anderem die Monte-Carlo-Methode mit Populationsgrößen $\mu = 1000 - 2500$ und einer Generationsanzahl von 1 realisiert und mit vorhandenen Ergebnissen abgeglichen werden konnte. Insbesondere diese Testläufe haben gezeigt, dass hierdurch relativ schnell Ergebnisse erzielt werden konnten, die jedoch wie erwartet über keine ausreichende Suchraumabdeckung verfügen. Grund hierfür ist der rein stochastische Charakter des Optimierungsmodells und das Fehlen von Parametern zur Steuerung der Exploration bzw. Exploitation. Ohne auf die Details der Testläufe einzugehen, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, haben die im umgesetzten Konzept verwendeten Einstellparameter zu guten Lösungen in angemessenen Antwortzeiten geführt. Da die richtige Kombination aus Exploitation und Exploration maßgeblich über den Erfolg der Optimierungsaufgabe entscheidet, bleibt hinsichtlich der Suchraumabdeckung festzustellen, dass die hier verwendeten GA-Parameter zu einer ausreichenden Diversität geführt haben. Auf die Bewertung der genetischen Operatoren hinsichtlich des Konvergenzverlaufs wird in Abschnitt 8.3.3 eingegangen. In Abb. 8-31 ist exemplarisch dem als 2D-Konturdiagramm dargestellten Lösungsraum aus Abschnitt 8.2.1 ein Punktediagramm der analysierten Lösungskandidaten gegenübergestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass insbesondere die Regionen lokaler Optima durch eine starke Exploitation gekennzeichnet sind. Die übrigen Regionen weisen eine gleichmäßige Abdeckung auf, was auf gute Einstellparameter für die Exploration des Suchraums schließen lässt.

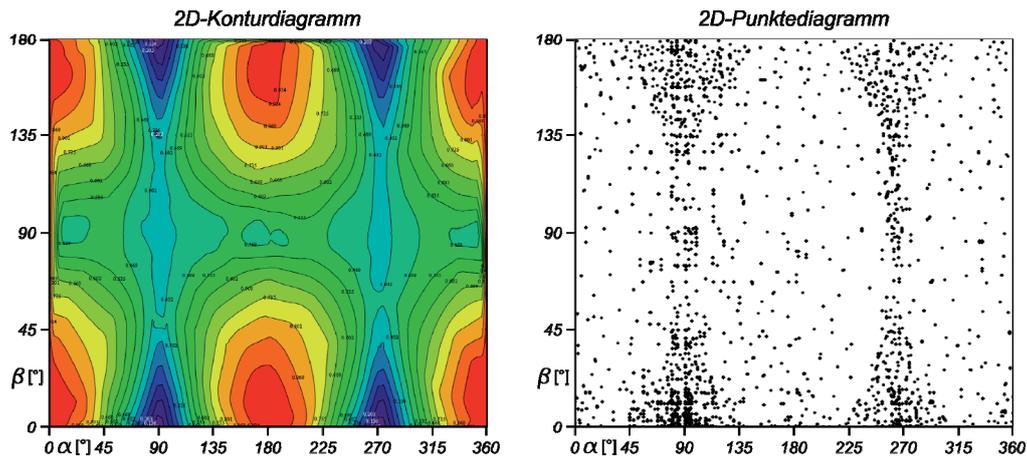


Abb. 8-31: Diversität der Suchraumabdeckung

8.3.3 Bewertung des Konvergenzverlaufs

Der Konvergenzverlauf war häufig dadurch gekennzeichnet, dass zunächst große Fortschritte bei der Optimumsuche verzeichnet werden konnten. Diese Einleitungsphase wurde jedoch häufig nach ca. 14 – 18 Generationen durch eine lange Periode geringerer Fortschritte abgelöst. Dies ist dadurch zu erklären, dass durch die größtenteils zufällige Generierung der Anfangspopulation die Heterogenität (Diversität) der Individuen anfangs noch hoch war. Das in diesem Konzept verwendete fitnessproportionale Selektionsschema bewirkt, dass die Individuen mit überdurchschnittlichem Fitnesswert stark bevorzugt werden. Sie nehmen mit ihren Nachkommen sehr schnell einen großen Anteil der Population ein und reduzieren somit die Heterogenität der Population. Die Rekombination verliert damit zunehmend an Effektivität, so dass die Fortschritte der Optimierung verstärkt vom seltenen Ergebnis einer erfolgreichen Mutation abhängig sind. Hieraus folgt, dass sich die Individuen zunehmend ähneln und somit auch ähnliche Selektionswahrscheinlichkeiten erhalten. Dies kommt einem Verlust der Zielorientierung gleich, bedeutet jedoch auch, dass ein Zustand der Konvergenz eintritt. Den typischen Konvergenzverlauf der in dieser Arbeit durchgeführten Optimierungen zeigt Abb. 8-32 beispielhaft anhand des in Abschnitt 8.2.5.2 aufgezeigten Anwendungsbeispiels „Knieimplantat“.

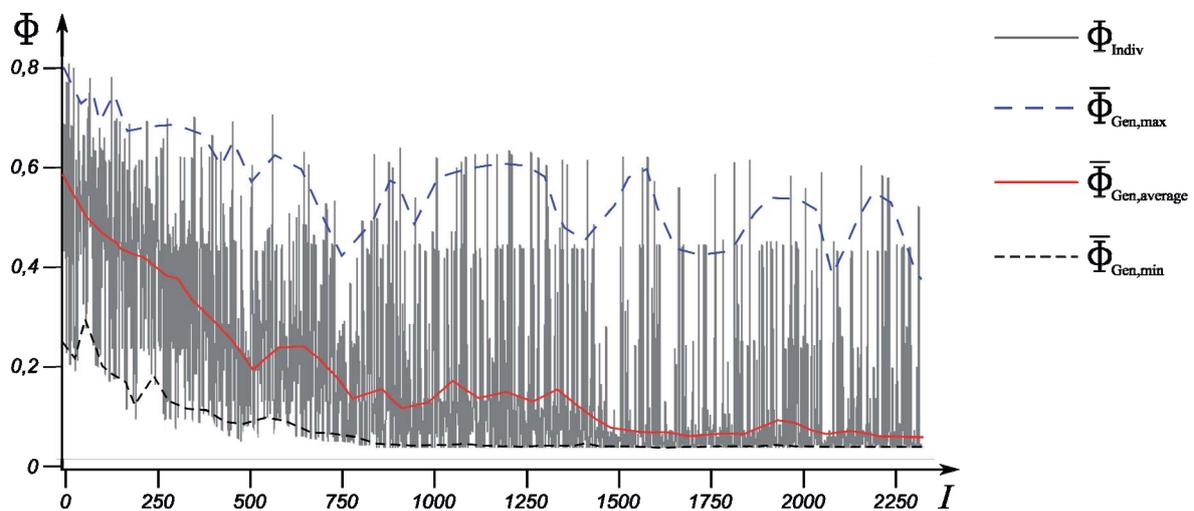


Abb. 8-32: Beispiel eines Konvergenzverlaufs

Hier ist die Fitness über die einzelnen Individuen aufgetragen (graue Kurve). Deutlich erkennbar sind die durchweg großen Schwankungen, die auf einen hohen explorativen Anteil zurückzuführen sind und somit zu hochdiversitären Lösungen führen. Während sich der pro Generation gemittelte Wert der maximal auftretenden Fitness (blau gestrichelte Kurve) im Laufe der Optimierung trotz großer Schwankungsbreite nur geringfügig absenkt, ist eine deutliche Abnahme der pro Generation gemittelten Minima (schwarz gestrichelte Kurve) zu verzeichnen. Dies deutet auf einen ausreichend hohen exploitativen Anteil hin, der schließlich die Konvergenz des Optimierungsvorgangs herbeiführt. Betrachtet man den Verlauf der durchschnittlichen Fitness (rote Kurve), so ist erkennbar, dass eine deutliche Abnahme zu verzeichnen ist und sich der Abstand zu den Minima reduziert. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass der Anteil guter Lösungen trotz vorhandener Exploration stetig zunimmt. Da zur Manipulation des explorativen bzw. exploitativen Anteils die genetischen Operatoren Rekombination bzw. Mutation dienen, lässt sich für die verwendeten Einstellparameter festhalten, dass diese zu einem guten Konvergenzverlauf geführt haben. Eine zu geringe Rekombinationsrate hätte zu einer unzureichenden Suchraumabdeckung geführt (geringe Schwankungen der grauen Kurve), während ein zu hoher Wert die Suche nach lokalen Optima behindert hätte (höhere Schwankungen der schwarzen Kurve). Die Mutationsrate hat durch die Verwendung von Gray-Code die lokale Suche und somit die Exploitation des Optimierungsprozesses vorangetrieben.

8.3.4 Fazit

Die entwickelten Algorithmen zur regelbasierten Charakterisierung der Einflussfaktoren auf die Produkt- und Prozessqualität generativer Fertigungsverfahren haben in einer repräsentativen Anzahl an Versuchsreihen zuverlässige Ergebnisse geliefert, die durch Erfahrungswerte fachkundiger Anwender bestätigt werden konnten. Die hier verwendeten Methoden der algorithmischen Geometrie haben dabei zur uneingeschränkten Anwendung auf beliebige Bauteilgeometrien geführt. Dies stellt ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiet dar. Das eingesetzte Optimierungsmodell hat insgesamt zu guten Lösungen mit vertretbarem Zeitaufwand geführt. Insbesondere der stochastische Anteil des genetischen Algorithmus hat gegenüber der Brute-Force-Methode die Effizienz des Optimierungssystems gewährleisten können. Die Tatsache, dass Einzelkriterien durch die Verwendung von Gewichtungsfaktoren gezielt einzeln angesteuert werden können, gestattet die anwendungsspezifische Konfiguration des Systems. Mehrkriterielle Optimierungstestläufe haben gezeigt, dass auch das Zusammenspiel der einzelnen Module zur ganzheitlichen Betrachtung der Bauteilqualität gut funktioniert und zu guten Ergebnissen geführt hat. Dennoch haben die Anwendungsbeispiele auch gezeigt, dass insbesondere bei konträren Fertigungszielen die Verteilung der Gewichtungsfaktoren noch auf Basis von Erfahrungswerten durchgeführt werden muss. Daher gilt es zukünftig eine automatische Gewichtung anzustreben.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz neuer Fertigungsverfahren gehört zu den Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz von Produktionsprozessen. Nicht unerwartet haben sich daher auch die Anwendungen der Rapid-Technologie im Laufe der Zeit als Potenzialträger im modernen Produktentwicklungsprozess herauskristallisiert. Aufgrund des Alleinstellungsmerkmals der nahezu werkzeuglosen generativen Bauteilherstellung mit signifikanter Gestaltungsfreiheit ging in den letzten Jahren der Einsatz dieses Verfahrens weit über die Erzeugung physischer Prototypen hinaus. Die Weiterentwicklungen auf diesem Gebiet haben vielmehr dazu geführt, dass mit Hilfe der Rapid-Technologie die schnelle Herstellung marktfähiger Produkte mit serienidentischen oder seriennahen Eigenschaften möglich ist. Einhergehend mit den Verfahrensverbesserungen und der zunehmenden Vielseitigkeit in der Anwendung ist jedoch auch die Anzahl verfahrensspezifischer Wechselwirkungen und somit insgesamt die Komplexität der Prozessvorbereitung angestiegen. Einen wesentlichen Bestandteil der Vorbereitungsmaßnahmen stellt die geeignete Auswahl der Bauteilorientierung dar. Sowohl orientierungsabhängige Effekte wie z. B. der Treppenstufeneffekt oder die Auswirkungen anisotroper Materialeigenschaften, als auch wirtschaftliche Gesichtspunkte müssen bei der Wahl der Bauteilausrichtung Berücksichtigung finden. Dieser Vorgang gestaltet sich jedoch mit steigender Bauteilkomplexität schwieriger und macht in zunehmendem Maße ein computergestütztes Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung notwendig. Darüber hinaus ist die Anwendung der Rapid-Technologie als integraler Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses und den damit verknüpften Prozessschritten dadurch gekennzeichnet, dass derzeit keine hinreichend geschlossene CAD/RP-Kette existiert. Hierunter ist die wechselseitige Verknüpfung der Prozessschritte Konstruktion, Fertigungsplanung und Fertigung zu verstehen. Insbesondere die Integration der Technologie in die CAx-Umgebung bedarf auch zukünftig besonderer Aufmerksamkeit. Zur Substitution konventioneller Fertigungsverfahren im Rahmen des Konstruktionsprozesses müssen die verfahrensspezifischen Besonderheiten konstruktiv berücksichtigt werden, was die Kenntnis orientierungsabhängiger Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität erfordert.

Die bisherige Prozessvorbereitung basiert auf umfangreichem Erfahrungswissen, da bis dato nicht auf eine geschlossene Wissensbasis zurückgegriffen werden kann. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Ansätze zur Beschreibung der auftretenden Wechselwirkungen entwickelt, die jedoch lediglich einzelne Qualitätskriterien adressieren. Daher existiert bisher kein zufriedenstellender Ansatz, der eine auf Regeln und geometrische Analyse gestützte Auswahl einer Bauteilorientierung unter Berücksichtigung qualitativer und wirtschaftlicher Aspekte ermöglicht. Ziel dieser Arbeit war es daher die bei der Wahl der Orientierung zu berücksichtigenden Einflusskriterien zu quantifizieren und mit Hilfe mathematischer Modelle entsprechende Gütekriterien zu definieren. Die erarbeiteten funktionalen Zusammenhänge zwischen diesen Kennwerten und den Suchvariablen zur Bestimmung der Bauteilorientierung sollten die quantitative Bewertung einer gegebenen Orientierung zulassen. Auf dieser Basis

galt es eine Methode zur multikriteriellen Optimierung unter ganzheitlicher Betrachtung fertigungstechnischer Randbedingungen zu erarbeiten.

Zur Umsetzung entsprechender Optimierungsstrategien wurden durch Abstraktion des Optimierungsproblems auf eine zunächst rein mathematische Ebene zahlreiche Routinen der algorithmischen Geometrie entwickelt und angewendet. Hierdurch konnten die von der Orientierung abhängigen Einflussfaktoren quantifiziert und ihre Auswirkungen auf die Bauteil- und Prozessqualität formuliert werden. Zur Bewertung der Oberflächenqualität wurden mathematische Modelle zur Charakterisierung des für generative Verfahren typischen Treppenstufeneffekts entwickelt. Des Weiteren wurden Möglichkeiten erarbeitet, Stützkonstruktionen hinsichtlich ihrer Kontaktfläche zur weiteren Bewertung der Oberflächenqualität sowie zur Abschätzung des Nachbearbeitungsaufwands zu analysieren. Zur zahlenmäßigen Erfassung des Materialverbrauchs für Stützkonstruktionen wurden Methoden zur Berechnung des Support-Volumens entwickelt. Dies betrifft sowohl Supports zwischen Bauteil und Bauplattform, als auch von Bauteil zu Bauteil. Ebenfalls algorithmisch berücksichtigt wurden die Gewährleistung der Entfernbareit der Stützstrukturen sowie die Stabilität des Bauteils zu jedem Zeitpunkt des Fertigungsprozesses. Neben der Oberflächenqualität wurde als weiteres Qualitätsmerkmal der Bauteilverzug berücksichtigt. Da zur Anwendung numerischer Methoden derzeit die genauen Wechselwirkungen nicht zufriedenstellend bekannt sind, wurde in dieser Arbeit ein mathematisches Modell zur Abschätzung des durch Temperaturgradienten hervorgerufenen Bauteilverzugs entwickelt. Hinsichtlich der wirtschaftlichen Bewertung des generativen Bauprozesses wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein mathematisches Modell zur Vorhersage der Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses entwickelt. Da die Bauraumaufteilung eng mit der Orientierung der einzelnen Bauteile verknüpft ist, wurde in dieser Arbeit ebenfalls ein Konzept zur Optimierung der Bauraumausnutzung entwickelt und vorgestellt.

Mit Blick auf mögliche Verfahrensverbesserungen und zukünftige Anwendungen wurden Möglichkeiten der heterogenen Objektrepräsentation entwickelt. Hierzu wurden Methoden zur Segmentierung und Klassifizierung von Polygonnetzen aufgezeigt und angewendet. In dieser Arbeit wurde ebenfalls eine Erweiterung des bestehenden De-facto-Standards STL zur Speicherung und Übertragung bauteilspezifischer Semantik aufgezeigt, wodurch attributierte Flächen zur Absicherung von Konstruktionszielen beitragen.

Zur Realisierung einer Multiziel-Optimierung hinsichtlich der Bauteilorientierung unter Beachtung fertigungstechnischer sowie funktionaler Randbedingungen in vertretbaren Antwortzeiten, wurde ein genetischer Algorithmus entworfen, der zuverlässige Lösungen mit begrenztem Aufwand liefert. Die entwickelten Algorithmen zur Lösung geometrischer Teilaufgaben wurden durch zahlreiche Anwendungsbeispiele hinsichtlich ihrer Ergebnisqualität und allgemeinen Anwendbarkeit validiert. Wesentliches Merkmal des Optimierungsmodells ist das Fehlen jeglicher Restriktionen. So lassen sich Bauteilorientierungen je nach Konfiguration des Optimierungssystems für die industriell relevantesten Verfahren optimieren. Ferner fehlen etwaige geometrische Einschränkungen, so dass im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten die Anwendbarkeit nicht auf primitive oder konvexe Geometrien beschränkt bleibt. Zur Verbesserung der Anbindung der Rapid-Technologie an die CAx-Landschaft wurde zudem exemplarisch für das 3D-CAD-System SolidWorks von Dassault Systèmes die Integration des Optimierungssystems realisiert.

Das hier vorgestellte Konzept zur multikriteriellen Optimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie ermöglicht für unterschiedliche Fertigungsziele die qualitative sowie quantitative Vorhersage der Prozess- und Bauteilqualität durch Simulation des Fertigungsprozesses. Durch den praktischen Bezug lässt sich das entwickelte Optimierungsmodell im Konstruktionsprozess zur Reduzierung der Produktentwicklungszeiten und zur Erschließung neuer Potenziale in der Rapid-Technologie durch Schließung der CAD-RP/RM-Kette einsetzen. Die weitere Einsatzmöglichkeit ist im Rahmen der Fertigungsvorbereitung zur regelbasierten Unterstützung des Anwenders bei der Auswahl der Bauteilorientierung denkbar.

Zur genaueren Abbildung des Fertigungsprozesses gilt es zukünftig die hier entwickelten Algorithmen durch weitere orientierungsabhängige Einflussfaktoren auf die Bauteil- und Prozessqualität zu erweitern. So werden zunehmend die mechanischen Eigenschaften (z. B. Festigkeit) im Vordergrund stehen, so dass weitere Methoden zur Quantifizierung oder Abschätzung zu entwickeln sein werden. Die derzeit noch zum Teil bestehenden Idealisierungen zur Kennwertermittlung eines auftretenden Bauteilverzugs oder der Entscheidungsgrundlage für die Ausführung von Stützkonstruktionen sind zukünftig durch abgesicherte Erfahrungswerte weiter zu qualifizieren. Grundlage hierfür ist jedoch die Existenz standardisierter Qualifizierungsmaßnahmen und einer geschlossenen Wissensbasis. Weitere durchzuführende Arbeiten betreffen die Entwicklung bzw. Standardisierung eines erweiterten RP/RM-gerechten Schnittstellenformats, die Optimierung sowie zuverlässige Bewertung von Belichtungsstrategien und die Untersuchung thermischer Zusammenhänge im Bauraum. Nur die Schaffung einer frei zugänglichen Wissensbasis, die auf abgesicherten Kennwerten beruht, wird auch in Zukunft den Transfer der Rapid-Technologie in die einzelnen Phasen der Produktentstehung und eine Zunahme der Breitenwirksamkeit ermöglichen können.

Literatur

- [Aga07] AGATHOS, A. et al.: *3D Mesh Segmentation Methodologies for CAD Applications*. In: Computer-Aided Design and Applications, Bd. 4 (2007), Nr. 6, S. 827-841
- [AAD98] ALEXANDER, P.; ALLEN, S.; DUTTA, D.: *Part Orientation and Build Cost Determination in Layered Manufacturing*. In: Computer-Aided Design, Bd. 30 (1998), S. 343-356
- [AIDu94] ALLEN, S.; DUTTA, D.: *On the Computation of Part Orientation Using Support Structures in Layered Manufacture*. Technical Report UM-MEAM-TR-94-15, Ann Arbor, University of Michigan, 1994
- [Att08] ATTENE, M.; MORTARA, M.; SPAGNUOLO, M.; FALCIDIENO, B.: *Hierarchical Convex Approximation of 3D Shapes for Fast Region Selection*. In: Computer Graphics Forum, Bd. 27 (2008), Nr. 5, S. 1323-1332
- [AuSp92] AUMANN, G.; SPITZMÜLLER, K.: *Computerorientierte Geometrie*. Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag, 1992
- [BaBa95] 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, 1995, S. 319-324
- [Bar08] BÁRTOLO, P. J. et al.: *Virtual and Rapid Manufacturing*. London: Taylor & Francis, 2008
- [BCG06] BAKSI, S.; CALVERT, J.; GROTE, K.-H.: *Generation of Sliced Scaffold Layers for Cultivation of Osseous Tissues*. In: 17th Annual Long Beach Research Symposium. California State University, Long Beach, 2006, S. 24
- [BeSh76] BENTLEY, J. L.; SHAMOS, M. I.: *Divide-and-Conquer in Multidimensional Space*. In: Proceedings of the 8th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 1976, S. 220-230
- [BeTa98] BERNARD, A.; TAILLANDIER, G.: *Le Prototypage Rapide*. Paris: Editions Hermes, 1998
- [Bir02] BIRKE, C.: *Der Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren im Konstruktionsprozess*. Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion, Diss., 2002
- [BiRa95] BISCHOFF, E. E.; RATCLIFF, M. S. W.: *Issues in the Development of Approaches to Container Loading*. In: The International Journal of Management Science, Bd. 23 (1995), Nr. 4, S. 377-390
- [BIRi04] BLUM, S.; RIEDEL, J.: *Mehrzieloptimierung durch evolutionäre Algorithmen*. In: Tagungsband der Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage, Weimar, 2004

- [Boh97] BOHN, J. H.: *File Format Requirements for the Rapid Prototyping Technologies of Tomorrow*. In: Proceedings of the International Conference on Manufacturing Automation, University of Hong Kong, 1997, S. 878-883
- [Bor10] BORILLE, A.; GOMES, J.; MEYER, R.; GROTE, K.-H.: *Applying Decision Methods to Select Rapid Prototyping Technologies*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 16 (2010), Nr. 1, S. 50-62
- [BoTe07] BOISSONNAT, J. D.; TEILLAUD, M.: *Effective Computational Geometry for Curves and Surfaces*. Berlin: Springer Verlag, 2007
- [BPF82] BENTLEY, J. L.; PREPARATA, F. P.; FAUST, M. G.: *Approximation Algorithms for Convex Hulls*. In: Communications of the ACM, Bd. 25 (1982), Nr. 1, S. 64-68
- [BRA92] BROCK ROONEY & ASSOCIATES Inc.: *STH File Format File Description, Version 1.2*. Birmingham, MI, 1992
- [ByLe05] BYUN, H. S.; LEE, K. H.: *Determination of Optimal Part Orientation in Layered Manufacturing Using a Genetic Algorithm*. In: International Journal of Production Research, Bd. 43 (2005), Nr. 13, S. 2709-2724
- [ByLe06] BYUN, H. S.; LEE, K. H.: *Determination of Optimal Build Direction in Rapid Prototyping with Variable Slicing*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 28 (2006), Nr. 3-4, S. 307-313
- [CDMS06] CANELLIDIS, V.; DEDOISSIS, V.; MANTZOURATOS, N.; SOFIANOPOULOU, S.: *Pre-processing Methodology for Optimizing Stereolithography Apparatus Build Performance*. In: Computers in Industry, Bd. 57 (2006), Nr. 5, S. 424-436
- [CGT97] CHUA, C. K.; GAN, G. K. J.; TONG, M.: *Interface between CAD and Rapid Prototyping Systems - Part 2: LMI - an Improved Interface*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 13 (1997), S. 571-576
- [ChFu95] CHENG, W.; FUH, J.; NEE, A.; WONG, Y.; LOH, H.; MIYAZAWA, T.: *Multi-Objective Optimisation of Part-Building Orientation in Stereolithography*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 1 (1995), Nr. 4, S. 12-23
- [ChKa70] CHAND, D. R.; KAPUR, S. S.: *An Algorithm for Convex Polytopes*. In: Journal of the ACM, Bd. 17 (1970), Nr. 1, S. 78-86
- [ChKw02] CHOI, S. H.; KWOK, K. T.: *A Tolerant Slicing Algorithm for Layered Manufacturing*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 8 (2002), Nr. 3, S. 161-179
- [ChSa02] CHOI, S. H.; SAMAVEDAM, S.: *Modelling and Optimisation of Rapid Prototyping*. In: Computers in Industry, Bd. 47 (2002), Nr. 1, S. 39-53
- [ChTa00] CHIU, W. K.; TAN, S. T.: *Multiple Material Objects: From CAD Representation to Data Format for Rapid Prototyping*. In: Computer-Aided Design, Bd. 32 (2000), Nr. 12, S. 707-717
- [CLL03] CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S.: *Rapid Prototyping - Principles and Applications*. New Jersey: World Scientific, 2003
- [Col03] COLEY, D. A.: *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers*. Singapur: World Scientific, 2003

- [CUS00] CORMIER, D.; UNNANON, K.; SANII, E.: *Specifying Non-Uniform Cusp Heights as a Potential Aid for Adaptive Slicing*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 6 (2000), Nr. 3, S. 204-212
- [CWY01] 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, Bd. 17 (2001), Nr. 7, S. 543-547
- [DaKö06] DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Ansätze zur RP-gerechten Gestaltung funktionaler Prototypen in parametrischen CAD-Systemen*. In: Tagungsband der Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2006
- [DaKö08] DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Bridging the Gap between CAD and Rapid Technologies – Exigency of Standardized Data Exchange*. In: Proceedings of the 12th European Forum on Rapid Prototyping, Ecole Centrale Paris, 2008
- [DaKö09] DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Multi-objective Optimization of Part Orientation for Non-Convex Parts in Rapid Technology Applications*. In: Proceedings of the 10th National Conference on Rapid Design, Prototyping & Manufacture, Bucks New University, High Wycombe, Buckinghamshire, UK, 2009
- [Dan09] DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Multi-objective Optimization of Part Orientation to Improve Process Planning in RM*. Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 2009
- [DeB00] DE BERG, M.; VAN KREVELD, M.; OVERMARS, M.; SCHWARZKOPF, O.: *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Berlin: Springer, 2000
- [DiKn98] DICKINSON, J. K.; KNOPF, G. K.: *Serial Packing of Arbitrary 3D Objects for Optimizing Layered Manufacturing*. In: Proceedings of SPIE-intelligent Robots and Computer Vision XVII: Algorithms, Techniques and Active Vision Conference, Boston, USA, 1998, S. 130-138
- [DiKn02] DICKINSON, J. K.; KNOPF, G. K.: *Packing Subsets of 3D Parts for Layered Manufacturing*. In: International Journal of Smart Engineering System Design, Bd. 4 (2002), Nr. 3, S. 147-161
- [DKO97] DUTTA, D.; KULKARNI, P.; O'NEILL, C.: *Improving Surface Quality and Throughput in Layered Manufacturing by Adaptive Slicing*. In: Proceedings of the 7th International Rapid Prototyping Conference, University of Dayton/Stanford University, 1997, S. 94-101
- [DoDr05] DOMSCHKE, W.; DREXL, A.: *Einführung in Operations Research*. Berlin: Springer Verlag, 2005
- [DoMa94] DOLENC, A.; MÄKELÄ, I.: *Slicing Procedures for Layered Manufacturing Techniques*. In: Computer-Aided Design, Bd. 26 (1994), Nr. 2, S. 119-126
- [Dreh05] DREHER, S.: *Flexible Integration von Rapid Prototyping-Prozessketten in die Produktionstechnik*. Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [DuSi01] DUTTA, D.; SINGH, P.: *Multi-Direction Slicing for Layered Manufacturing*. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering, Bd. 1 (2001), Nr. 2, S. 129-142

- [Dyc90] DYCKHOFF, H.: *A Typology of Cutting and Packing Problems*. In: European Journal of Operational Research, Bd. 44 (1990), Nr. 2, S. 145-159
- [DyFi92] DYCKHOFF, H.; FINKE, U.: *Cutting and Packing in Production and Distribution: A Typology and Bibliography*. New York: Springer Verlag, 1992
- [Ebe00] EBERLY, D.: *3D Game Engine Design*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2000
- [Ede87] EDELSBRUNNER, H.: *Algorithms in Combinatorial Geometry*. Berlin: Springer Verlag, 1987
- [Ele02] ELEY, M.: *Solving Container Loading Problems by Block Arrangement*. In: European Journal of Operational Research, Bd. 141 (2002), Nr. 2, S. 393-409
- [FPM99] DE FLORIANI, L.; PUPPO, E.; MAGILLO, P.: *Applications of Computational Geometry to Geographic Information Systems*. In: Handbook of Computational Geometry, (1999), S. 333-388
- [FrFa95] FRANK, D.; FADEL, G.: *Expert System-Based Selection of the Preferred Direction of Build for Rapid Prototyping Processes*. In: Journal of Intelligent Manufacturing, (1995), Nr. 6, S. 339-345
- [GBB02] GROTE, K.-H.; BROCKOP, S.; BERKAU, A.: *Costs of Rapid Prototyping Applications*. In: Proceedings of the 5th International Conference on Managing Innovative Manufacturing, Milwaukee, 2002.
- [Geb07] GEBHARDT, A.: *Generative Fertigungsverfahren - Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing*. 3. Aufl., München: Hanser Verlag, 2007
- [GeoTo] Geometric Tools, LLC: Dokumentation der Softwarebibliothek Wild Magic, Version 4.10. URL: <http://www.geometrictools.com>
- [Geu96] GEUER, A.: *Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung*. TU München, iwB, Diss., 1996
- [GKK04] GERDES, I.; KLAWONN, F.; KRUSE, R.: *Evolutionäre Algorithmen: Genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen*. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2004
- [GKT07] GHORPADE, A.; KARUNAKARAN, K. P.; TIWARI, M. K.: *Selection of Optimal Part Orientation in Fused Deposition Modelling Using Swarm Intelligence*. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Bd. 221 (2007), Nr. 7, S. 1209-1219
- [Gol05] GOLDBERG, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley, 2005
- [GoOR04] GOODMAN, J. E.; O'ROURKE, J.: *Handbook of Discrete and Computational Geometry - Discrete Mathematics and its Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2004
- [GoPa08] GOGATE, A. S.; PANDE, S. S.: *Intelligent Layout Planning for Rapid Prototyping*. In: Int. Journal of Production Research, Bd. 46 (2008), Nr. 20, S. 5607-5631
- [Got00] GOTTSCHALK, S.: *Collision Queries Using Oriented Bounding Boxes*. Chapel Hill, University of North Carolina, Diss., 2000
- [Gra72] GRAHAM, R. L.: *An Efficient Algorithm for Determining the Convex Hull of a Finite Planar Set*. In: Inform. Processing Letters, Bd. 1 (1972), Nr. 4, S. 132-133

- [GSG05] GROTE, K.-H.; SULC, J.; GRONWALD, S.: *Intelligente Bauteile - Integration von mechatronischen Elementen in prototypische Bauteile*. In: 3. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Universität Bayreuth, 2009, S. 195-202
- [Hag00] HAGIHARA, S.; FURUKAWA, S.; KIYOHURO, N.; MAKINO, H.: *Laser Lithography for Making Jewelry — A Concept of Diagonal Irradiation*. In: Proceedings of the 8th International Conference on Rapid Prototyping, Tokyo, 2000, S. 118-123
- [Hec94] HECKBERT, P. S.: *Graphics Gems IV*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1994
- [HHD06] HOPKINSON, N.; HAGUE, R. J. M.; DICKENS, P. M.: *Rapid Manufacturing - An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester: Wiley, 2006
- [HiLi09] HILLER, J. D.; LIPSON, H.: *STL 2.0: A Proposal for a Universal Multi-material Additive Manufacturing File Format*. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, University of Texas, 2009
- [HJDS02] HAN, W.; JAFARI, M. A.; DANFORTH, S. C.; SAFARI, A.: *Tool Path-based Deposition Planning in Fused Deposition Processes*. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, Bd. 124 (2002), S. 462
- [Hof95] HOFFMANN, J.: *Vom Rapid Prototyping bis zur Serienproduktion*. In: Maschinenmarkt, Bd. 101 (1995), Nr. 16, S. 30-34
- [Hon02] HONG, T. P.; WANG, H. S.; LIN, W. Y.; LEE, W. Y.: *Evolution of Appropriate Crossover and Mutation Operators in a Genetic Process*. In: Applied Intelligence, Bd. 16 (2002), Nr. 1, S. 7-17
- [HRJ97] HOPE, R. L.; ROTH, R. N.; JACOBS, P. A.: *Adaptive Slicing with Sloping Layer Surfaces*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 3 (1997), Nr. 3, S. 89-98
- [HuLe98] HUR, J.; LEE, K.: *The Development of a CAD Environment to Determine the Preferred Build-Up Direction for Layered Manufacturing*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 14 (1998), Nr. 4, S. 247-254
- [Hur01] HUR, S. M.; CHOI, K. H.; LEE, S. H.; CHANG, P. K.: *Determination of Fabricating Orientation and Packing in SLS Process*. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 112 (2001), Nr. 2-3, S. 236-243
- [Iko97] IKONEN, I. et al.: *A Genetic Algorithm for Packing Three-Dimensional Non-Convex Objects Having Cavities and Holes*. In: Proceedings of the 7th International Conference on Genetic Algorithms, 1997, S. 591-598
- [ISO94] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange – Part 1: Overview and fundamental principles*. ISO 10303-1, 1994
- [Jack00] JACKSON, T. R.: *Analysis of Functionally Graded Material Object Representation Methods*. Boston, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2000
- [JaHa95] JAMIESON, R.; HACKER, H.: *Direct Slicing of CAD Models for Rapid Prototyping*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 1 (1995), Nr. 2, S. 4-12
- [Jar73] JARVIS, R. A.: *On the Identification of the Convex Hull of a Finite Set of Points in the Plane*. In: Information Processing Letters, Bd. 2 (1973), S. 18-21

- [JKL01] JUN, C. S.; KIM, D. S.; LEE, H. C.; HWANG, J.; CHANG, T. C.: *Surface Slicing Algorithm Based on Topology Transition*. In: Computer-Aided Design, Bd. 33 (2001), Nr. 11, S. 825-838
- [JoMe99] JOPPE, M.; MEIER, I. R.: *The Rapid Prototyping Workbench - A New Concept of Data Preparation for Rapid Prototyping Processes*. In: Proceedings of the 12th International Conference on Engineering Design, München, 1999, S. 1905-1908
- [Jon75] DE JONG, K.: *An Analysis of the Behaviour of a Class of Genetic Adaptive Systems*. Ann Arbor, University of Michigan, Diss., 1975
- [JoTh07] JOSWIG, M.; THEOBALD, T.: *Algorithmische Geometrie - Polyedrische und algebraische Methoden*. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007
- [JPM98] JONEJA, A.; PANG, K. W.; MURTY, K. G.; LAM, D. C. C.; YUAN, M. M.: *A Genetic Algorithm for Path Planning in Rapid Prototyping*. In: Proceedings of the ASME DETC, DFM conference, 1998, S. 16-19
- [JWL00] JENG, J. Y.; WONG, Y. S.; LI, Y. H.: *A New Practical Adaptive Slicing Method for the SLP RP System to Accelerate Fabrication Speed without Accuracy Sacrifice*. In: Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Bd. 21 (2000), Nr. 4, S. 351-358
- [KaNa06] KAMRANI, A.; NASR, E. A.: *Rapid Prototyping - Theory and Practice*. Boston, MA: Springer, 2006
- [Kas99] KASCHKA, U.: *Methodik der Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Bewertung von konventionellen und Rapid-Tooling-Prozessketten*. Universität Magdeburg, Institut für Maschinenkonstruktion, Diss., 1999
- [KFP02] KOBAYASHI, K. G.; FUJII, M.; PRINZ, F. B.: *Conceptual Data Model for Advanced Rapid Prototyping*. In: Proceedings of the 10th International Conference on Precision Engineering, Yokohama, Japan, 2002, S. 122-126
- [KiLe05] KIM, H.; LEE, S.: *Reduction of Post-Processing for Stereolithography Systems by Fabrication-Direction Optimization*. In: Computer-Aided Design, Bd. 37 (2005), S. 711-725
- [KLP94] KIM, J. Y.; LEE, K.; PARK, J. C.: *Determination of Optimal Orientation in Stereolithographic Rapid Prototyping*. Technical Report, Seoul National University, Department of Mechanical Design and Production Engineering, 1994
- [Knu98] KNUTH, D. E.: *The Art of Computer Programming – Volume 3: Sorting and Searching*. Redwood City, CA: Addison Wesley Longman Publishing, 1998
- [Koc01] KOC, B.: *Computational Geometric Analysis and Planning for 3D Rapid Prototyping Processes*. North Carolina State University, Diss., 2001
- [KuCh05] KUMAR, C.; CHOUDHURY, A. R.: *Volume Deviation in Direct Slicing*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 11 (2005), Nr. 3, S. 174-184
- [KuDu95] KULKARNI, P.; DUTTA, D.: *Adaptive Slicing of Parameterizable Algebraic Surfaces for Layered Manufacturing*. In: Advances in Design Automation, ASME Design Engineering Technical Conferences, Boston, USA, 1995, S. 211-217
- [KuDu96] KULKARNI, P.; DUTTA, D.: *An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing*. In: Computer-Aided Design, Bd. 28 (1996), Nr. 9, S. 683-697

- [KuDu97] KUMAR, V.; DUTTA, D.: *An Approach to Modeling Multi-material Objects*. In: Proceedings of the 4th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, Atlanta, USA, 1997, S. 336-345
- [Kum98] KUMAR, C. et al.: *Towards STEP-Based Data Transfer in Layered Manufacturing*. In: Proceedings of the 10th International IFIP, 1998
- [Lau02] LAU, W. et al.: *XML Representation and Process Algorithm for Layered Manufacturing of Heterogeneous Objects*. In: Proceedings of 13th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA, 2002, S. 255-270
- [LCCG97] LAN, P. T.; CHOU, S. Y.; CHENT, L. L.; GEMMILL, D.: *Determining Fabrication Orientations for Rapid Prototyping with Stereolithography Apparatus*. In: Computer-Aided Design, Bd. 29 (1997), Nr. 1, S. 53-62
- [LeCh00] LEE, K. H.; CHOI, K.: *Generating Optimal Slice Data for Layered Manufacturing*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 16 (2000), Nr. 4, S. 277-284
- [Lew03] LEWIS, J. E.: *Strategies of Distributed Genetic Algorithms for Three-Dimensional Bin Packing in a SLS Machine*. University of Louisville, Diss., 2003
- [LiCh01] LIAO, Y. S.; CHIU, Y. Y.: *A New Slicing Procedure for Rapid Prototyping Systems*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 18 (2001), Nr. 8, S. 579-585
- [LLM07] LOBO, F. G.; LIMA, C. F.; MICHALEWICZ, Z.: *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*. Springer Publishing Company Inc., 2007
- [LRW03] LIM, A.; RODRIGUES, B.; WANG, Y.: *A Multi-Faced Buildup Algorithm for Three-Dimensional Packing Problems*. In: The International Journal of Management Science, Bd. 31 (2003), Nr. 6, S. 471-481
- [LSY01] LIN, F.; SUN, W.; YAN, Y.: *Optimization with Minimum Process Error for Layered Manufacturing Fabrication*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 7 (2001), Nr. 2, S. 73-81
- [Mach99] MACHT, M.: *Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping*. TU München, iwb, Diss., 1999
- [MaJa98] MAJHI, J.; JANARDAN, R.; SMID, M.; SCHWERDT, J.: *Multi-Criteria Geometric Optimization Problems in Layered Manufacturing*. In: Proceedings of the 4th ACM Symposium on Computational Geometry, Minneapolis, USA, 1998, S. 19-28
- [Mar97] MARSAN, A. L. et al.: *An Integrated Software System for Process Planning for Layered Manufacturing*. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas, Austin, TX, 1997
- [MaRa02] MASOOD, S. H.; RATTANAWONG, W.: *A Generic Part Orientation System Based on Volumetric Error in Rapid Prototyping*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 19 (2002), Nr. 3, S. 209-216
- [MaWh99] MANGAN, A. P.; WHITAKER, R. T.: *Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation*. In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Bd. 5 (1999), Nr. 4, S. 308-321

- [MBH04] MA, W.; BUT, W. C.; HE, P.: *NURBS-Based Adaptive Slicing for Efficient Rapid Prototyping*. In: Computer-Aided Design, Bd. 36 (2004), Nr. 13, S. 1309-1325
- [McR98] McCLURKIN, J. E.; ROSEN, D.: *Computer-aided Build Style Decision Support for Stereolithography*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 4 (1998), Nr. 1, S. 4-13
- [MiGi02] MING, L. W.; GIBSON, I.: *Specification of VRML in Color Rapid Prototyping*. In: International Journal of CAD/CAM, Bd. 1 (2002), Nr. 1, S. 1-9
- [Mit02] MITCHELL, M.: *An Introduction to Genetic Algorithms*. New Delhi: Prentice Hall of India, 2002
- [MKD99] MANI, K.; KULKARNI P. DUTTA, D.; et al.: *Region-based Adaptive Slicing*. In: Computer Aided Design, Bd. 31 (1999), Nr. 5, S. 317-33
- [MSS02] MCMAINS, S.; SMITH, J.; SEQUIN, C.: *The Evolution of a Layered Manufacturing Interchange Format*. In: ASME Design Engineering Technical Conferences - 28th Design Automation Conference, 2002
- [MVM09] MILLER, F. P.; VANDOME, A. F.; MCBREWSTER, J.: *Quaternions and Spatial Rotation*. Beau Bassin: Alphascript Publishing, 2009
- [NaMa03] NAGY, M. S.; MATYASI, G. Y.: *Analysis of STL Files*, In: Mathematical and Computer Modelling, Bd. 38 (2003), S. 945-960
- [Ngo94] NGOI, B. K. A.; TAY, M. L.; CHUA, E. S.: *Applying Spatial Representation Techniques to the Container Packing Problem*. In: International Journal of Production Research, Bd. 32 (1994), Nr. 1, S. 111-123
- [Niss97] NISSEN, V.: *Einführung in evolutionäre Algorithmen*. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1997
- [Noo06] NOORANI, R.: *Rapid Prototyping - Principles and Applications*. Hoboken, NJ: Wiley, 2006
- [OK06] VAN OOSTEROM, P. J.; VAN KREVELD, M.: *Geo-information and Computational Geometry*. Rotterdam: Netherlands Geodetic Commission, 2006
- [Oro98] O'ROURKE, J.: *Computational Geometry in C*. Cambridge University Press, 1998
- [Pap96] PAPAGEORGIOU, M.: *Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. München: Oldenbourg Verlag, 1996
- [PaSi05] PANDEY, P. M.; SINGHAL, S. K.; PANDEY, A. P.; NAGPAL, A. K.: *Optimum Part Deposition Orientation in Stereolithography*. In: Computer-Aided Design and Applications, Bd. 2 (2005), Nr. 1-4, S. 319-328
- [Pat02] PATIL, L. et al.: *A Proposed ISO 10303 (STEP)-based Approach for Representing Heterogeneous Objects for Layered Manufacturing*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 8 (2002), Nr. 3, S. 134-146
- [PDG99] PHAM, D. T.; DIMOV, D. T.; GAULT, R. S.: *Part Orientation in Stereolithography*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 15, (1999), Nr. 9, S. 674-682
- [PMKD98] PRATT, M.; MARSAN, A. L.; KUMAR, V.; DUTTA, D.: *An Assessment of Data Requirements and Data Transfer Formats for Layered Manufacturing*. Technical Report NISTIR 6216, National Inst. of Stand. and Techn., Gaithersburg, 1998

- [Pohl99] POHLHEIM, H.: *Evolutionäre Algorithmen*. Berlin: Springer Verlag, 1999
- [Pop05] POPRAWA, R.: *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*. Berlin: Springer Verlag, 2005
- [Pra00] PRATT, M. J.: *Modeling of Material Property Variation for Layered Manufacturing*. In: Proc. of the 9th Conf. on the Mathematics of Surfaces, Cambridge, UK, 2000
- [PRD03] PANDEY, P. M.; REDDY, N. V.; DHANDE, S. G.: *A Real Time Adaptive Slicing for Fused Deposition Modeling*. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Bd. 43 (2003), Nr. 1, S. 61-71
- [PrHo77] PREPARATA, F. P.; HONG, S. J.: *Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions*. In: Commun. of the ACM, Bd. 20 (1977), Nr. 2, S. 87-93
- [PrSh85] PREPARATA, F. P.; SHAMOS, M. I.: *Computational Geometry - An Introduction*. New York: Springer Verlag, 1985
- [Ratt01] RATTANAWONG, W.; MASOOD, S. H.; IOVENITTI, P.: *A Volumetric Approach to Part-build Orientations in Rapid Prototyping*. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 119 (2001), Nr. 1-3, S. 348-353
- [Rec73] RECHENBERG, I.: *Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1973
- [ReCo97] REEVES, P. E.; COBB, R. C.: *Reducing the Surface Deviation of Stereolithography Using In-process Techniques*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 3 (1997), Nr. 1, S. 20-31
- [ReEk03] RENNER, G.; EKÁRT, A.: *Genetic Algorithms in Computer Aided Design*. In: Computer-Aided Design, Bd. 35 (2003), S. 709-726
- [Rot06] ROTHLAUF, F.: *Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms*. 2. Aufl., Heidelberg: Springer Verlag, 2006
- [RoWo91] ROCK, S. J.; WOZNY, M. J.: *A Flexible File Format for Solid Freeform Fabrication*. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas, Austin, 1991, S. 1-12
- [Sch75] SCHWEFEL, H. P.: *Evolutionsstrategie und numerische Optimierung*. TU Berlin, Diss., 1975
- [Sche08] SCHEITHAUER, G.: *Zuschnitt- und Packungsoptimierung*. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag, 2008
- [Schi01] SCHILLEN, V.: *Erzeugung hochgenauer Schichtzerlegungen von 3D-Modellen für den Einsatz in Rapid-Prototyping-Anwendungen*. Univ. Stuttgart, Diss., 2001
- [Schw01] SCHWERDT, J.: *Entwurf von Optimierungsalgorithmen für geometrische Probleme im Bereich Rapid Prototyping und Manufacturing*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Diss., 2001
- [SCL07] SUN, S. H.; CHIANG, H. W.; LEE, M. I.: *Adaptive Direct Slicing of a Commercial CAD Model for Use in Rapid Prototyping*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 37 (2007), Nr. 7-8, S. 689-701

- [Seh10] SEHRT, J.: *Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren*. Universität Duisburg-Essen, Diss., 2010
- [Sha78] SHAMOS, M. I.: *Computational Geometry*. New Haven, Yale University, Diss., 1978
- [SHB96] SABOURIN, E.; HOUSER, S. A.; BOHN, J. H.: *Adaptive Slicing Using Stepwise Uniform Refinement*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 2 (1996), Nr. 4, S. 20-26
- [SHB97] SABOURIN, E.; HOUSER, S. A.; BOHN, J. H.: *Accurate Exterior, Fast Interior Layered Manufacturing*. In: Rapid Prototyping Journ., Bd. 3 (1997), Nr. 2, S. 44-52
- [Siu02] SIU, Y. K.; TAN, S. T.: *Modeling the Material Grading and Structures of Heterogeneous Objects for Layered Manufacturing*. In: Computer-Aided Design, Bd. 34 (2002), Nr. 10, S. 705-716
- [SJCS99] SMID, M.; JOHNSON, E.; CASTILLO, P.; SCHWERDT, J.: *Heuristics for Estimating Contact Area of Supports in Layered Manufacturing*. In: Journal of Experimental Algorithmics, Bd. 12 (1999), S. 241-267
- [Sla03] SLABY, E.: *Einsatz evolutionärer Algorithmen zur Optimierung im frühen Konstruktionsprozess*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 361, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003
- [SmFo97] SMITH, J. E.; FOGARTY, T. C.: *Operator and Parameter Adaptation in Genetic Algorithms*. In: Soft Computing – A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, Bd. 1 (1997), Nr. 2, S. 81-87
- [SrDu94] SREERAM, P.; DUTTA, D.: *Determination of Optimal Orientation Based on Variable Slicing Thickness in Layered Manufacturing*. Technical Report UM-MEAM-TR-94-14, Dept. of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 1994
- [StXi00] STROUD, I.; XIROUCHAKIS, P. C.: *STL and Extensions*. In: Advances in Engineering Software, Bd. 31 (2000), Nr. 2, S. 83-95
- [Sun00] SUN, W.: *Multi-volume CAD Modeling for Heterogeneous Object Design and Fabrication*. In: Journal of Computer Science and Technology, Bd. 15 (2000), Nr. 1, S. 27-36
- [Sun05] SUN, W.; STARLY, B.; NAM, J.; DARLING, A.: *Bio-CAD Modeling and its Applications in Computer-aided Tissue Engineering*. In: Computer-Aided Design, Bd. 37 (2005), S. 1097-1114
- [SuWo94] SUH, Y.; WOZNY, M. J.: *Adaptive Slicing of Solid Freeform Fabrication Processes*. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas, Austin, TX, 1994, S. 404-411
- [Tan05] TAN, K. H. et al.: *Selective Laser Sintering of Biocompatible Polymers for Applications in Tissue Engineering*. In: Bio-Medical Materials and Engineering, Bd. 15 (2005), Nr. 1, S. 113-124
- [TeHa07] TEICH, J.; HAUBELT, C.: *Digitale Hardware/Software-Systeme: Synthese und Optimierung*. Berlin: Springer Verlag, 2007
- [TFBA98] TATA, K.; FADEL, G. M.; BAGCHI, A.; AZIZ, N.: *Efficient Slicing for Layered Manufacturing*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 4 (1998), Nr. 4, S. 151-167

- [TGKE09] TRÄGER, R.; GROTE, K.-H.; KLAUSMEYER, U.; ENGELMANN, F.: *Anwendung der Rapid-Prototyping-Technologie für Kleinserien im Explosionsschutz*. In: 7. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Universität Bayreuth, 2009
- [ThCr95] THOMPSON, D. C.; CRAWFORD, R. H.: *Optimising Part Quality with Orientation*. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Bd. 6, Austin, University of Texas, 1995, S. 362-368
- [Tou83] TOUSSAINT, G.: *Solving Geometric Problems with the Rotating Calipers*. In: Proceedings of the IEEE MELECON'83, Athens, 1983
- [TPR04] THRIMURTHULLU, K.; PANDEY, P. M.; REDDY, N. V.: *Optimum Part Deposition Orientation in Fused Deposition Modeling*. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Bd. 44 (2004), Nr. 6, S. 585-594
- [TyBo98] TYBERG, J.; BOHN, J. H.: *Local Adaptive Slicing*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 4 (1998), Nr. 3, S. 118-127
- [VDI03] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Computational Intelligence – Evolutionäre Algorithmen – Begriffe und Definitionen*. VDI/VDE-Richtlinie 3550 Blatt 3, 2003
- [VDI07] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Generative Fertigungsverfahren – Rapid-Technologien (Rapid Prototyping) – Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen*. VDI-Richtlinie 3404, 2007
- [WaLe07] WANG, D.-X.; LENG, H.-W.: *Slicing of CAD Models in ETL Format*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 13 (2007), Nr. 1, S. 53-57
- [Wall] WALL, M: Dokumentation der Softwarebibliothek GALib, Version 2.4.7. URL: <http://lancet.mit.edu/ga>
- [Wei07] WEICKER, K.: *Evolutionäre Algorithmen*. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2007
- [WiSe09] WITT, G.; SEHRT, J.: *Auswirkung des anisotropen Gefüges strahlgeschmolzener Bauteile auf mechanische Eigenschaftswerte*. In: Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2009
- [Witt09] WITT, G. et al.: *Rapid Prototyping / Rapid Manufacturing im Instrumentenbau für die minimalinvasive Chirurgie*. In: Tagungsband der RAPROMED'09, Beckmann-Institut für Technologieentwicklung, Oelsnitz, 2009
- [WiWi09] WITT, G.; WIESNER, A.: *Selective Laser Melting – Trends und Entwicklungen für die generative Fertigung metallischer Komponenten*. In: Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2009
- [WFK94] WODZIAK, J. R.; FADEL, G. M.; KIRSCHMAN, C.: *A Genetic Algorithm for Optimizing Multiple Part Placement to Reduce Build Time*. In: Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, OH, 1994, S. 201-210
- [Woh08] WOHLERS, T.: *Wohlers Report 2008 – State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins: Wohlers Associates Inc., 2008
- [WSR01] WEST, A. P.; SAMBU, S. P.; ROSEN, D. W.: *A Process Planning Method for Improving Build Performance in Stereolithography*. In: Computer-Aided Design, Bd. 33 (2001), Nr. 1, S. 65-79

- [WuCh06] WU, T.; CHEUNG, E. H. M.: *Enhanced STL*. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 29 (2006), Nr. 11-12, S. 1143-1150
- [XLW99] XU, F.; LOH, H. T.; WONG, Y. S.: *Considerations and Selection of Optimal Orientation for Different Rapid Prototyping Systems*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 5 (1999), Nr. 2, S. 54-60
- [Xu97] XU, F.; WONG, Y.; LOH, H.; FUH, J.; MIYAZAWA, T.: *Optimal Orientation with Variable Slicing in Stereolithography*. In: Rapid Prototyping Journal, Bd. 3 (1997), Nr. 3, S. 76-88
- [Yan08] YANG, W.; LIU, W.; LIU, L.; XU, A.: *A Genetic Algorithm for Automatic Packing in Rapid Prototyping Processes*. In: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Computing, 2008, S. 1072-1077
- [YoAd94] YOSHIDA, Y.; ADACHI, N.: *A Diploid Genetic Algorithm for Preserving Population Diversity – Pseudo-meiosis GA*. In: Proceedings of the Intern. Conf. on Evol. Comp. 3rd Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 1994, S. 45
- [Zäh06] ZÄH, M. F.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien – Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München: Hanser Verlag, 2006
- [Zäh07] ZÄH, M. et al.: *Untersuchung und Simulation der Energiekopplung bei Metall verarbeitenden generativen Fertigungsverfahren*. In: Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2007
- [Zha02] ZHANG, X.; ZHOU, B.; ZENG, Y.; GU, P.: *Model Layout Optimization for Solid Ground Curing Rapid Prototyping Processes*. In: Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Bd. 18 (2002), Nr. 1, S. 41-51
- [ZhLa00] ZHAO, Z.; LAPERRIERE, L.: *Adaptive Direct Slicing of the Solid Model for Rapid Prototyping*. In: International Journal of Production Research, Bd. 38 (2000), Nr. 1, S. 69-83
- [Zhou04] ZHOU, M. Y.: *Adaptive Slicing of Functionally Graded Material Objects for Rapid Prototyping*. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Bd. 24 (2004), Nr. 5, S. 345-352
- [ZLW05] ZHAO, J.; LIU, W.; WU, J.: *Determination of Optimal Build Orientation Based on Satisfactory Degree Theory for RPT*. In: International Journal of CAD/CAM, Bd. 6 (2005), Nr. 1, S. 51-58
- [ZXY03] ZHOU, M. Y.; XI, J. T.; YAN, J. Q.: *STEP-Based Direct Slicing Algorithm for Rapid Prototyping*. In: Journ. Shanghai University, Bd. 37 (2003), Nr. 5, S. 737-740
- [ZXY04] ZHOU, M. Y.; XI, J. T.; YAN, J. Q.: *Modeling and Processing of Functionally Graded Materials for Rapid Prototyping*. In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 146 (2004), Nr. 3, S. 396-402

Anhang

Wirkprinzipien des geometrischen Schichtaufbaus

In diesem Abschnitt werden die dem geometrischen Schichtaufbau zugrunde gelegten physikalischen Prinzipien sowie gängige industrielle Verfahren, die auf diesen Prinzipien basieren, vorgestellt. Die im Folgenden aufgeführten industriellen Umsetzungen stellen dabei lediglich einen Ausschnitt aus einer Vielzahl realisierter Anlagen dar. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht nicht. Bei den genannten Verfahren handelt es sich um eingetragene Markenzeichen oder geschützte Bezeichnungen der Anlagenhersteller. Aufgrund der Vielzahl angebotener Anlagen stellen die Werte für die erzielbaren Schichtdicken und die maximalen Bauteilabmessungen lediglich Richtwerte dar und sollen ein Gefühl für den Einsatzzweck und die technischen Möglichkeiten der genannten Verfahren vermitteln.

Generieren aus der flüssigen Phase

Bei den auf diesem physikalischen Prinzip basierenden Verfahren beruht die Schichtgenerierung auf der Verfestigung un- oder niedrigvernetzter Monomere bzw. Photopolymere (z. B. Epoxydharz, Venyletherharz). Der Zusammenhalt wird infolge eines durch ultraviolette (UV) Strahlung initiierten Polymerisationsprozesses²⁶ geschaffen. Daher werden diese Verfahren auch als (Photo-)Polymerisation bezeichnet. Aufgrund vielfältiger Möglichkeiten zur lokalen Induzierung der Polymerisation haben sich im Laufe der Zeit verschiedene Techniken zur Nutzung dieses Wirkprinzips entwickelt.

Laser-Scanner-Verfahren

Das *Laser-Scanner-Verfahren*, zu dem auch das Stereolithographie-Verfahren (engl. *stereolithography apparatus* – SLA) gehört, stellt die älteste und verbreitetste Methode dar. Anhand dieses Verfahrens lassen sich die grundsätzlichen Prozessschritte der meisten generativen Verfahren verdeutlichen, so dass dieser Abschnitt bewusst ausführlicher gehalten wurde. Alle weiteren genannten Verfahren besitzen ähnliche Teilprozesse oder es wird explizit auf die abgrenzenden Unterschiede hingewiesen. Bei der Stereolithographie wird das zu fertigende Bauteil auf einer in einem Polymerharzbad vertikal verfahrbaren Bauplattform aufgebaut (siehe Abb. A-1). Zu Beginn des Bauprozesses befindet sich die Plattform bzw. die Bauteil tragende Struktur (*Base*) um den Betrag einer Schichtdicke unterhalb der Badoberfläche. Ein Laser mit kurzen Wellenlängen (≤ 500 nm) bildet anschließend mit Hilfe der aus der Schichtzerlegung ermittelten Konturdaten über ein Spiegel-System den ersten Querschnitt

²⁶ Polymerisation bezeichnet eine chemische Kettenreaktion, bei der ungesättigte Moleküle (Monomere) zu Makromolekülen (Polymere) verknüpft werden.

des zu fertigenden Bauteils auf der Oberfläche des Harzbades ab. Die lokal induzierte Energie sorgt für das für eine Polymerisation notwendige kritische Energieniveau. Anschließend wird die Plattform erneut um den Betrag einer Schichtdicke herabgesenkt. Bevor der Prozess bis zur Fertigstellung des Bauteils wiederholt und die nächsten Konturen im Harzbad verfestigt werden, muss die bereits belichtete Schicht mit neuem Polymerharz bedeckt werden. Zur Neubeschichtung (engl. *recoating*) finden zwei verschiedene Techniken Anwendung. Beim sogenannten *Deep-Dip* wird die Plattform zunächst um ein Vielfaches der Schichtdicke herabgesenkt, so dass neues Harz über die bereits belichtete Schicht fließen kann. Anschließend wird nach einem Wischvorgang zur Glättung der Harzoberfläche die Plattform auf den korrekten Wert angehoben. Im Gegensatz dazu wird beim sogenannten *Active Recoating* die Plattform um den Betrag einer Schichtdicke herabgesenkt und anschließend aktiv neues Harz mit Hilfe eines Vorratsbehälters aufgetragen. Die Nivellierung erfolgt wiederum mit Hilfe eines Wischsystems.

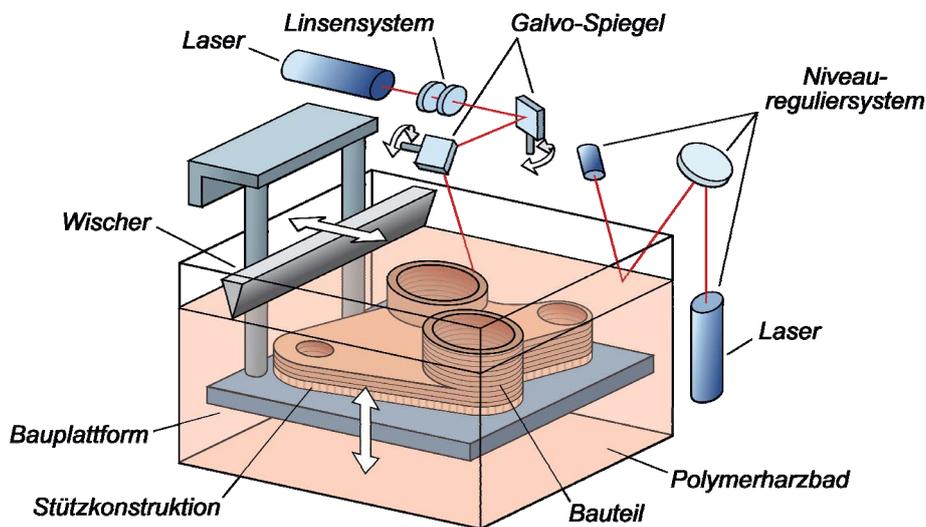


Abb. A-1: Verfahrensprinzip der Stereolithographie

Der Grad der Aushärtung und die dafür notwendige Energiedichte können über die Laserleistung, die Strahlparameter sowie über die Belichtungsgeschwindigkeit und/oder die Belichtungsstrategie gesteuert werden. Insgesamt wird das Monomer nur zu einem Teil (~95 %) ausgehärtet. Ein anschließender Nachvernetzungsvorgang in einem speziell hierfür vorgesehenen Ofen (*Post Curing Oven*) sorgt für die endgültige Aushärtung des Materials. Ein höherer Aushärtegrad während des Bauprozesses würde infolge der hierdurch auftretenden Dichteänderungen benachbarter Schichten zu einem Verzug des Bauteils führen. Der hohe Aushärtegrad wird erreicht, indem durch die Anwendung geeigneter Belichtungsstrategien dem Bauteil Möglichkeiten zur Relaxation gegeben werden. Zur Realisierung angepasster Belichtungsparameter kommt dem eingesetzten Laser eine besondere Bedeutung zu. Moderne Festkörperlaser (z. B. Nd:YAG-Laser) ermöglichen die dynamische Regelung der Laserleistung sowie des Strahldurchmessers. Dagegen finden aufgrund des schlechten Wirkungsgrades die früher eingesetzten HeCd- oder Ar^{++} -Laser kaum noch Anwendung. Neben der Verfestigung einer Bauteilschicht gilt es den zweiten Teilschritt des generativen Fertigungsprozesses umzusetzen: die Verbindung benachbarter Schichten. Entscheidend hierfür ist ebenfalls die Laserleistung, genauer die Eindringtiefe des Lasers. Letztere sollte so groß sein, dass sowohl die zu belichtende Schicht als auch ein Teil der darunter liegenden Schicht verfestigt wird. Die Differenz zwischen der Einhärtetiefe und der Schichtdicke wird als *Overcure* be-

zeichnet. Die entstehende Festigkeit während des generativen Bauprozesses (sog. Grünfestigkeit) ist aufgrund der Teilvernetzung relativ gering, so dass das Bauteil durch von Temperaturgradienten hervorgerufene innere Spannungen oder das Eigengewicht verformt werden kann. Um dies zu vermeiden werden Stützkonstruktionen eingesetzt, die nach dem Fertigungsprozess wieder entfernt werden.

VORTEILE

- Die Laser-Stereolithographie erzielt die derzeit höchste Genauigkeit (Stand 2010), welche bei diesem Verfahren nicht durch physikalische sondern technische Grenzen (z. B. Laser-Strahldurchmesser) beschränkt ist [Geb07]. Hierdurch können komplexe Geometrien sowie sehr dünne Wandstärken erzielt werden.
- Aufgrund der geringen eingesetzten Laserleistungen (i. d. R. $< 1\text{W}$) und damit des geringen Wärmeeintrags ist die Gefahr von Wärmespannungen relativ gering. Mit entscheidend ist jedoch auch die Belichtungsstrategie.
- Das Verfahren gestattet die Herstellung von Bauteilen mit Hohlräumen. Hierfür sind jedoch Drainageöffnungen vorzusehen, so dass überflüssiges Material abfließen kann.
- Aufgrund transparenter oder transluzenter²⁷ Materialien eignet sich dieses Verfahren zur Herstellung von Versuchsbauteilen für strömungstechnische oder medizinische Untersuchungen.
- Nicht vernetztes Monomer lässt sich wiederverwenden.
- Mit Hilfe der Stereolithographie hergestellte Bauteile können mit üblichen Nachbearbeitungsverfahren (Spanen nur eingeschränkt) zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften (Oberflächengüte, Optik, Haptik u. Ä.) bearbeitet werden.

NACHTEILE

- Aufgrund des polymerisierenden Wirkprinzips mittels UV-Strahlung ist die Stereolithographie an photosensitive Materialien gebunden. Diese weisen in der Regel schlechtere mechanische Materialeigenschaften als metallische Werkstoffe auf. Aktuelle Entwicklungen zielen jedoch auf Harze mit verbesserten Eigenschaften ab.
- Das flüssige Ausgangsmaterial bietet keine ausreichende Stützwirkung für überkragende oder freitragende Bauteilbereiche. Daher sind Stützkonstruktionen notwendig, die in einem Folgeprozess wieder entfernt werden müssen.
- Die hygroskopische Eigenschaft der Epoxydharze kann zum Kriechen des Bauteils führen. Eine hohe Maßhaltigkeit erfordert daher die sachgemäße Lagerung und Verarbeitung der Bauteile [Geb07]. Die Photosensitivität einiger Ausgangsmaterialien führt zu einem Alterungsprozess, so dass Stereolithographie-Bauteile im Laufe der Zeit ihre mechanischen Eigenschaften verändern [Zäh06]. Insbesondere die zunehmende Sprödigkeit kann zum Bruch der Bauteile führen.
- Der gesamte Prozess stellt ein zweistufiges Verfahren dar. Da in der Anlage das Monomer nicht vollständig vernetzt wird muss das Bauteil (Grünling) in einem Folgeprozess mittels intensiver UV-Strahlung restausgehärtet werden.

²⁷ Transluzenz beschreibt in Abgrenzung zur Transparenz (Bilddurchlässigkeit) die allgemeine Lichtdurchlässigkeit.

ANWENDUNGEN

Stereolithographie-Verfahren werden vorwiegend zur Herstellung von Konzeptmodellen oder Funktionsprototypen eingesetzt. Um den Vorteil der schnellen Bauteilherstellung mittels Stereolithographie mit einem um Materialien mit besseren mechanischen Eigenschaften erweiterten Materialspektrum kombinieren zu können, werden Stereolithographie-Bauteile auch als Urmodelle für den Vakuum- (Kunststoff) oder Feinguss (Metall) eingesetzt. Beispiele industrieller Umsetzungen der Laser-Scanner-Verfahren liefert Tab. A-1.

Tab. A-1: Beispiele industrieller Laser-Scanner-Verfahren

Bezeichnung	Firma	Schichtdicken [mm]	max. Bauraum (B×T×H) [mm]	Materialien
Stereolithography App. (SLA)	3D Systems Inc. (USA)	0,02 – 0,3	1500 × 750 × 500	Epoxydharz
Stereolithographie	Fockele & Schwarze (DE)	Herstellung von Stereolithographie-Anlagen wurde eingestellt.		
Rapid Micro Product Developm.	microTEC (DE)	0,001 – 0,2	200 × 300 × ?	Acrylat, Epoxydharz
Paste Polymerization	OptoForm LLC (USA)	0,035 – 0,12	250 × 350 × 500	Acrylat, Composite
Digital Wax	Next Factory (IT)	0,01 – 0,1	200 × 200 × 200	Wachs, proprietär
Stereolithography	D-MEC Ltd. (JP)	0,005 – 0,01	1000 × 800 × 500	Acrylat, Epoxydharz
Stereolithography	Materialise (BE)	0,1 – 0,2	2100 × 700 × 800	Harz, proprietär
Stereolithography	Autostrade Inc. (JP)	0,05 – 0,2	200 × 200 × 200	Acrylat
Stereographie	EOS GmbH (DE)	Herstellung von Stereographie-Anlagen wurde eingestellt.		
Solid Object UV-Laser Print.	CMET Inc. (JP)	0,05 – 0,2	600 × 600 × 500	Acrylat, Epoxydharz
Solid Creation	Sony MSA Inc. (USA)	0,05 – 0,2	1000 × 800 × 500	Epoxydharz
Solid Imaging	AAROFLEX Inc. (USA)	0,05 – 0,5	635 × 635 × 635	Epoxydharz

Lampen-Masken-Verfahren

Lampen-Masken-Verfahren basieren ebenfalls auf dem Prinzip der Photopolymerisation, unterscheiden sich jedoch durch die Art der Belichtung. Im Gegensatz zu Laser-Scanner-Verfahren werden die einzelnen Bauteilquerschnitte nicht sukzessive mit Hilfe eines Lasers, sondern in einem Schritt mittels einer Hochleistungs-UV-Lampe durch eine Maske abgebildet. Die Masken werden bei den verschiedenen industriellen Verfahren auf unterschiedliche Weise hergestellt. Allen gemein ist jedoch, dass je Bauteilschicht eine Maske zur Abbildung der Schichtgeometrie vorliegt. Das Lampen-Masken-Verfahren soll exemplarisch anhand des industriellen Verfahrens *Solid Ground Curing* (SGC) der Fa. Cubital Ltd. erläutert werden (vgl. Abb. A-2).

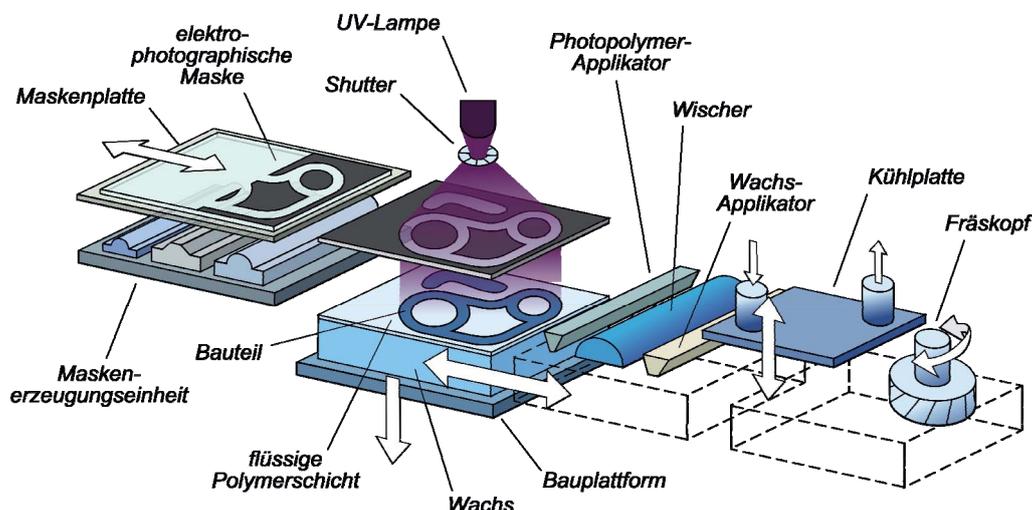


Abb. A-2: Verfahrensprinzip der Masken-Stereolithographie am Beispiel SGC

Andere Verfahren unterscheiden sich durch unterschiedliche Ausgangsmaterialien, technische Anordnungen oder Strategien zur Neubeschichtung, bauen jedoch auf dem gleichen Prinzip auf. Mit Hilfe eines elektrostatischen Verfahrens wird die Maske für den ersten Bauteilquerschnitt generiert. Auf eine Bauplattform wird anschließend eine Harzschicht aufgetragen, die mit Hilfe der Hochleistungs-UV-Lampe durch die Maske belichtet wird. Entsprechend der Maske erfolgt die Aushärtung des Photopolymers. Überschüssiges nicht ausgehärtetes Harz wird abgesaugt und das dadurch entstehende Leervolumen mit flüssigem Wachs aufgefüllt. Eine Kühlplatte sorgt für die Erstarrung des thermoplastischen Wachses, das auf diese Weise die stützende Wirkung übernimmt. Anschließendes Planfräsen gewährleistet die Maßhaltigkeit des Bauteils in z-Richtung. Während dieses Vorgangs wird die Maske für den nächsten Querschnitt generiert. Nach der Neubeschichtung der Trägerplatte wiederholt sich dieser Prozess bis zur Fertigstellung des Bauteils.

VORTEILE

- Mit diesem Verfahren sind Bauteile hoher Komplexität herstellbar.
- Die parallel ablaufenden Zyklen der Masken- und der Schichtgenerierung sowie die Belichtung eines gesamten Querschnitts in einem Schritt ermöglichen die schnelle Fertigung von Prototypen und somit auch einen großen Durchfluss bei Kleinserien.
- Lampen-Masken-Verfahren arbeiten einstufig, so dass das Material vollständig polymerisiert wird und keine Nachvernetzung erforderlich ist.
- Das Bauvolumen, welches nicht mit Baumaterial gefüllt wird, besteht vollständig aus thermoplastischem Stützmaterial. Hierdurch ist eine im Rahmen der Modellvorbereitung gesondert zu entwerfende Stützkonstruktion nicht notwendig. Des Weiteren lassen sich die lösungsmittelpfindlichen Stützen auswaschen oder (teil-)automatisiert entfernen.
- Bei jeder Neubeschichtung wird nur soviel Material aufgetragen, wie für die Schichterzeugung notwendig ist. Dies begünstigt schnelle Materialwechsel.

NACHTEILE

- Dadurch, dass das gesamte Leervolumen mit Wachs ausgefüllt wird, entsteht ein hoher Anteil an nicht weiterverwendbarem Material.
- Das gefertigte Bauteil muss von Stützkonstruktionen befreit und gereinigt werden.
- Das verwendbare Materialspektrum ist noch sehr schmal und auf photosensitive Polymere beschränkt.

ANWENDUNGEN

Lampen-Masken-Verfahren werden zur Erzeugung von Konzeptmodellen, Geometrie- und Funktionsprototypen oder indirekt durch Abformverfahren (Vakuum- oder Feingießen) zur Herstellung von Werkzeugen oder Formen eingesetzt. Beispiele für industrielle Umsetzungen des Lampen-Masken-Prinzips liefert Tab. A-2.

Tab. A-2: Beispiele industrieller Lampen-Masken-Verfahren

Bezeichnung	Firma	Schichtdicken [mm]	max. Bauraum (B×T×H) [mm]	Materialien
Solid Ground Curing (SGC)	Cubital Ltd. (IL)	Herstellung von SGC-Anlagen wurde eingestellt.		
Digital Light Processing (DLP)	envisionTEC GmbH (DE)	0,025 – 0,2	510 × 335 × 455	Acrylat, proprietär
Film Transfer Imaging	3D Systems Inc. (USA)	0,1 – 0,25	180 × 225 × 200	Acrylat

Polymer-Druck-Verfahren

Das Polymer-Druck-Verfahren nutzt das Prinzip der Polymerisation, unterscheidet sich jedoch von anderen Polymerisationsverfahren in der Art der Materialbereitstellung. Anstelle einer flächendeckenden Flüssigharzschicht sorgen beheizte Multi-Düsen-Druckköpfe für eine kontinuierliche Zufuhr flüssigen Materials (Abb. A-3). Dabei kann unterschiedliches Bau- und Stützmaterial simultan zugeführt werden. Mitgeführte UV-Hochleistungslampen sorgen schließlich für den notwendigen Energieeintrag zur Initiierung des Polymerisationsprozesses.

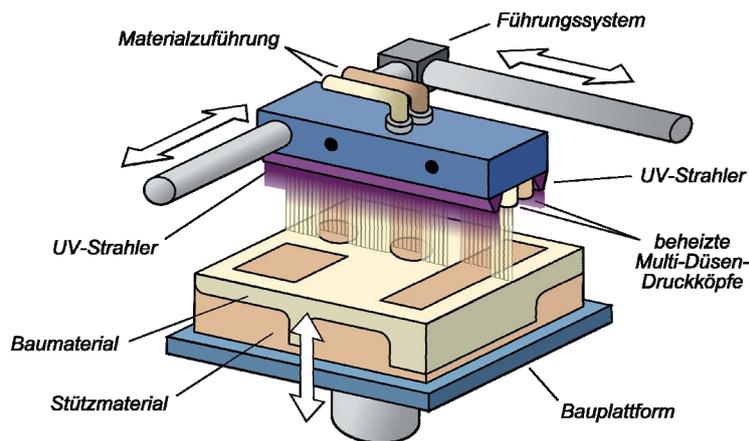


Abb. A-3: Verfahrensprinzip des Polymer-Drucks am Beispiel PJM

VORTEILE

- Das Verfahren ermöglicht hohe Genauigkeiten und eine gute Oberflächenqualität.
- Das Bauteil wird in einem einzigen Prozess vollständig ausgehärtet und erfordert keine Nachhärtung.
- Das notwendige Stützmaterial ist wasserlöslich und kann in einem einfachen Folgeprozess entfernt werden.

NACHTEILE

- Das Bauteil besitzt eine relativ geringe Festigkeit.
- Das gefertigte Bauteil muss von Stützkonstruktionen befreit und gereinigt werden.
- Das verwendbare Materialspektrum ist noch sehr schmal und auf photosensitive Polymere beschränkt.

ANWENDUNGEN

Die Haupteinsatzgebiete des Polymer-Druck-Prinzips sind Konzeptmodelle, Funktionsprototypen und die Herstellung heterogener Bauteile, also Bauteile aus verschiedenen Materialien. Beispiele industrieller Umsetzungen des Polymer-Druck-Verfahrens finden sich in Tab. A-3.

Tab. A-3: Beispiele industrieller Polymer-Druck-Verfahren

Bezeichnung	Firma	Schichtdicken [mm]	max. Bauraum (B×T×H) [mm]	Materialien
PolyJet Modeling (PJM)	Objet Ltd. (IL)	0,016 – 0,03	500 × 400 × 200	Acrylat, proprietär
Multi-Jet Modeling (MJM)	3D Systems Inc. (USA)	0,016 – 0,3	300 × 185 × 205	Acrylat, Wachs

Generieren aus der festen Phase

Aufgrund der für die Polymerisation notwendigen Eigenschaften flüssiger Materialien ergeben sich unweigerlich Nachteile in Bezug auf die verwendbare Materialvielfalt, die mechanischen Eigenschaften oder auch die weitergehende Verarbeitbarkeit. Daher haben sich verschiedene Ansätze entwickelt, die auf der Basis fester Ausgangsmaterialien beruhen. Im Folgenden werden die in der Praxis relevantesten Verfahrensprinzipien vorgestellt.

Sinter- und Schmelz-Verfahren

In Analogie zur Stereolithographie verfolgen die Sinter- und Schmelzverfahren das Konzept lokaler Verfestigung eines die Bauplattform bedeckenden Materials (vgl. Abb. A-4).

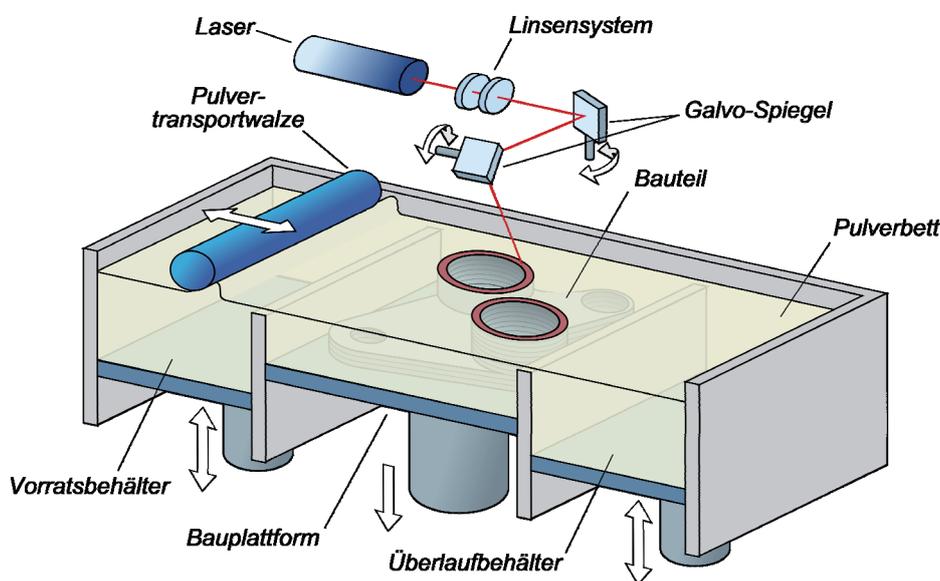


Abb. A-4: Verfahrensprinzip der Sinter- und Schmelz-Verfahren am Beispiel SLS

Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal ist jedoch das zugrunde gelegte physikalische Wirkprinzip. Die Ausgangswerkstoffe liegen in Pulver- oder Granulatform vor und werden mit Hilfe eines Laser-, Elektronen- oder Infrarotstrahls lokal gesintert (amorphe Werkstoffe) bzw. verschmolzen (kristalline Werkstoffe). Um die einzubringende Energiemenge möglichst gering zu halten, wird das Ausgangsmaterial bis auf knapp unterhalb der Sinter- bzw. Schmelztemperatur erwärmt, so dass die eingesetzte Energiequelle lediglich für eine geringe Energiedifferenz aufkommen muss. Die anschließende Abkühlung infolge auftretender Wärmeleitung sorgt für die Verfestigung des Materials und die Verbindung benachbarter Schichten. Prinzipiell benötigen Sinter- und Schmelzverfahren keine Stützkonstruktionen, da das nicht versinterte bzw. verschmolzene Material die Stützwirkung übernimmt. Bei metallbasierten Verfahren werden dennoch Stützkonstruktionen eingesetzt, da sie aufgrund der größeren Wärmeabfuhr und ihrer Funktion zur Fixierung der Bauteile zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Spannungen dienen. Ein wesentliches Element zur Sicherstellung der Prozess- und Bauteilqualität ist die genaue Temperaturregelung im Bauraum. Ein zu berücksichtigendes Charakteristikum der Sinter- und Schmelzverfahren stellt die auftretende Volumenänderung dar. Das Schrumpfverhalten der Materialien kann zu Maßungenauigkeiten oder zum Aufrollen (Curling) führen, was jedoch durch die Einführung entsprechender Schrumpffaktoren während der Datenmodellierung kompensiert werden kann.

VORTEILE

- Die einsetzbare Materialpalette ist sehr groß, da als Materialeigenschaft lediglich ein thermoplastisches Verhalten vorausgesetzt wird.
- Die guten mechanischen und thermischen Eigenschaften der generierten Bauteile ermöglichen die Herstellung von Bauteilen mit Endproduktcharakter.
- Nicht verfestigtes Kunststoffpulver kann recycelt und erneut dem Prozess zugeführt werden (Recycling-Rate: ~30–50 %).
- Das Bauteil wird in einem einzigen Prozess vollständig verfestigt und erfordert keine Nachhärtung. Die erzeugten Bauteile sind daher prinzipiell sofort einsatzbereit und erfordern keine Nachbehandlungsverfahren zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften.

NACHTEILE

- Das Verfahren ermöglicht eine geringere Auflösung und Oberflächenqualität als bei Polymerisationsverfahren. Wesentlicher Limitierungsfaktor stellt die Korngröße des eingesetzten Pulvers und der verwendete Strahldurchmesser dar [Geb07].
- Das thermoplastische Verhalten der Werkstoffe führt zur ungewollten Verbindung zwischen dem Bauteil und angrenzenden Pulverpartikeln. Die Bauteile neigen zum „Wachsen“. Als Folge hiervon ergeben sich Maßungenauigkeiten.
- Die Durchführung des Prozesses unter Inertgas (Verhinderung der Oxidation) führt zu höheren Prozesskosten. Darüber hinaus tragen die langen Aufheiz- und Abkühlphasen zu langen Prozesszeiten bei.

ANWENDUNGEN

Das Anwendungsspektrum der Sinter- und Schmelz-Verfahren umfasst die Erzeugung von Konzeptmodellen, technischen Prototypen und Funktionsprototypen, die direkte Herstellung von Funktionsbauteilen, Werkzeugeinsätzen oder metallischen Endprodukten. Gerade die Schmelzverfahren zeigen die größten Potenziale im Bereich des Rapid Manufacturing. Beispiele industrieller Umsetzungen der Sinter- und Schmelz-Verfahren liefert Tab. A-4.

Tab. A-4: Beispiele industrieller Sinter- und Schmelz-Verfahren

Bezeichnung	Firma	Schichtdicken [mm]	max. Bauraum (B×T×H) [mm]	Materialien
Selective Laser Sintering (SLS)	3D Systems (USA)	0,07 – 0,2	550 × 550 × 750	PA, Composite
Lasersintern	EOS GmbH (DE)	0,02 – 0,2	700 × 380 × 580	PA, Composite
Selective Laser Melting (SLM)	MCP-HEK (DE)	0,02 – 0,1	250 × 250 × 250	Metall, Keramik
Laser Cusing	Concept Laser (DE)	0,02 – 0,08	300 × 350 × 300	Stahl, Alu, Titan
Direktes Laserformen	Trumpf Laser (DE)	0,05 – 0,2	250 × 250 × 160	Metall
Laser Engin. Net Shaping	Optomec Inc. (USA)	0,002 – 0,8	1000 × 1500 × 1000	Edelstahl, Titan
Lasersintern	Phenix Systems (FR)	0,01 – 0,06	250 × 250 × 300	Metall, Keramik
Direct Metal Deposition	POM (USA) / Trumpf	0,1 – 1,4	2000 × 1000 × 750	Stahl, NiCo-Leg.
Electron Beam Melting	Arcam AB (SE)	0,02 – 0,5	250 × 200 × 400	St., Titan, CoCr-Leg.
Selective Mask Sintering	SpeedPart AB (SE)	0,05 – 0,12	300 × 210 × 500	propriet. PA

Schicht-Laminat-Verfahren

Einen völlig anderen Ansatz zur schichtweisen Fertigung von Bauteilen stellen die Schicht-Laminat-Verfahren dar. Das Verfahrensprinzip sieht die Schichterzeugung aus vorgefertigtem

Halbzeug (Folien, Platten) vor, welche anschließend zu einem dreidimensionalen Objekt gefügt werden. Dabei basiert der Fügevorgang auf dem Prinzip der Lamination. Daher werden solche Verfahren auch als *Layer Laminat Manufacturing* (LLM) bezeichnet. Im Gegensatz zu den meisten anderen generativen Fertigungsverfahren stellen die Schicht-Laminat-Verfahren somit hinsichtlich des Materialzusammenhalts ein hybrides Verfahren dar. Während das Fügen der Schichten einen additiven Prozess darstellt, erfolgt die Konturierung der einzelnen Schichten subtraktiv mit Hilfe von Lasern, Messern oder Fräsern. Während prinzipiell auch die Verbindung metallischer oder keramischer Schichten möglich ist, findet dieses Verfahrensprinzip hauptsächlich Anwendung zur Erzeugung von Bauteilen aus Kunststoff- oder Papierfolien. So wird beim bekanntesten industriellen Vertreter dieses Verfahrens (*Laminated Object Manufacturing – LOM*) ein in Rollenform vorhandenes Material über die Bauplattform positioniert, mit Hilfe einer beheizten Laminierwalze (ca. 330°C) und einem thermisch aktivierbaren Kleber mit vorherigen Schichten verbunden und die zuvor ermittelten Querschnittskonturen über einen Laser ausgeschnitten (Abb. A-5). Zur Sicherstellung der Entpackbarkeit des Bauteils werden die übrigen Bereiche rasterförmig zerschnitten.

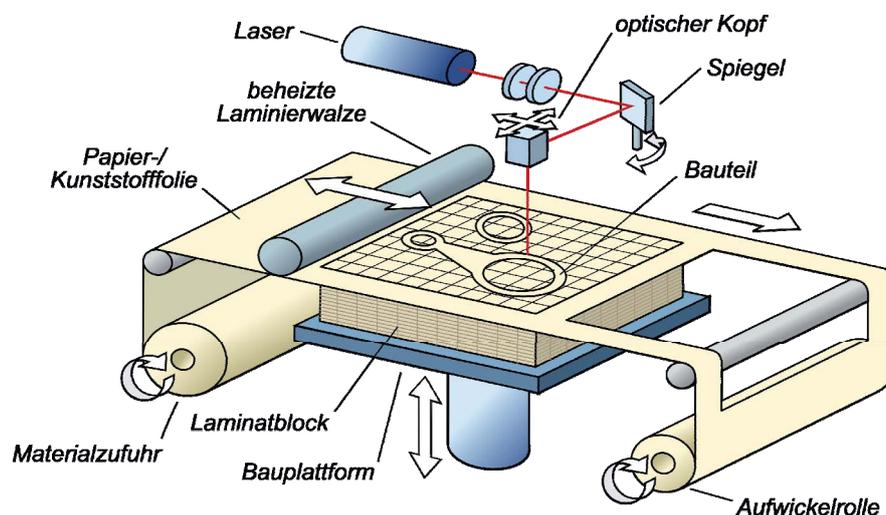


Abb. A-5: Verfahrensprinzip der Schicht-Laminat-Verfahren am Beispiel LOM

VORTEILE

- Dieses Verfahren eignet sich besonders für großflächige Bauteile, da eine zeit- und kostenintensive Schraffierung der Querschnittsflächen zur Verfestigung entfällt.
- Die Bauteile weisen eine besonders hohe Druckbeständigkeit auf, insbesondere bei dünnwandigen Bauteilen eine hohe Stabilität.
- Die eingesetzten Materialien sind unempfindlich gegenüber dem Wärmeeintrag, so dass es zu keinem Verzug, Schrumpf oder zu Deformationen kommt.
- Stützkonstruktionen sind nicht notwendig aufgrund der stützenden Wirkung des das Bauteil umgebenden Laminatblocks.
- Einige einsetzbare Materialien erlauben eine hohe Infiltrierbarkeit der Bauteile.
- Laser als konturierende Werkzeuge ermöglichen prinzipiell den Einsatz beliebiger Werkstoffe (Papier, Kunststoff, Metall, Keramik, Verbundwerkstoffe, etc.).

NACHTEILE

- Aufgrund der hybriden Vorgehensweise besitzen die Bauteile große Unterschiede zwischen der Festigkeit innerhalb einer Schicht und der Spaltfestigkeit. Diese Anisotropie kann bis zur Delamination einzelner Schichten führen.
- Eingeschlossene Bereiche (Hohlräume) lassen sich aufgrund des umgebenden Laminatblocks nachträglich nicht mehr entfernen.
- Der Anteil des Verschnitts, also des nicht verwendeten Materials der Rolle, ist unter Umständen sehr hoch, was den Vorteil der niedrigen Verbrauchsmaterialkosten relativiert.
- Derzeitige technische Umsetzungen erlauben nur die Verwendung einer einzigen Schichtstärke. Der Vorteil einer adaptiven Schichtzerlegung kann hier (noch) nicht genutzt werden.

ANWENDUNGEN

Schicht-Laminat-Verfahren dienen hauptsächlich der schnellen und kostengünstigen Erzeugung von Konzeptmodellen sowie Funktionsprototypen, insbesondere wenn die Bauteile große Querschnittsflächen aufweisen. Aufgrund der guten Finishmöglichkeiten eignet sich dieses Verfahren auch für die Erzeugung von Designprototypen. Beispiele industrieller Umsetzungen des Schicht-Laminat-Verfahrens liefert Tab. A-5.

Tab. A-5: Beispiele industrieller Schicht-Laminat-Verfahren

Bezeichnung	Firma	Schichtdicken [mm]	max. Bauraum (B×T×H) [mm]	Materialien
Laminated Obj. Manuf. (LOM)	Cubic Technol. (USA)	0,08 – 0,2	820 × 560 × 510	Papier, Polyester
Plastic Sheet Lamination	3D Systems (USA)	0,165 – 0,168	160 × 210 × 135	PVC
Paper Lamination	encee Systems (DE)	0,08 – 0,15	400 × 300 × 300	Papier
Layer Laminate Manuf.	Kinergy (CN)	0,1	1180 × 750 × 550	Papier, Kunststoff
Plastic Sheet Lamination	Solido Ltd. (IL)	0,165	160 × 210 × 135	PVC
Paper Lamination	Kira Corp. (JP)	0,08 – 0,16	400 × 300 × 300	Papier
Stratoconception	Stratoconcept (FR)	kontinuierl. z-Kontur	6060 × 2050 × 250	Holz, Kunststoff, Alu
Rapid Prototyping	Boxford (GB)	0,1 – 0,3	150 × 100 × 50	Papier
Layer Milling	F. Zimmermann (DE)	kontinuierl. z-Kontur	1200 × 100 × 750	Ureol, Alu, Graphit

Extrusionsverfahren

Extrudierende Verfahren werden auch als *Fused Layer Modeling* (FLM) bezeichnet und zeichnen sich durch das Aufbringen aufgeschmolzener Materialien aus. So wird z. B. beim industriellen Verfahren *Fused Deposition Modeling* (FDM) in Form von Drähten konfektioniertes Material mit Hilfe einer beheizten Düse aufgeschmolzen und in plastischem Zustand auf die Bauplattform bzw. auf vorherige Konturschichten abgelegt (Abb. A-6). Das Material wird dabei knapp über die Erstarrungstemperatur erhitzt, während der Bauraum dicht unterhalb der Schmelztemperatur gehalten wird. Dies ermöglicht eine schnelle Verfestigung des Materials nach Austritt aus der Düse und gewährleistet die erforderlichen Adhäsionskräfte zur Verbindung benachbarter Schichten. Nicht zum Bauteil gehörende Bereiche werden mit einem speziellen Material (z. B. wasserlösliches Wachs) aufgefüllt, so dass am Ende des Fertigungsprozesses das Bauteil aus einem verfestigten Baumaterial besteht, während nicht mehr benötigtes Bauvolumen entfernt werden kann. Die Verbindung zwischen den einzelnen Schichten erfolgt neben dem beim Erstarrungsprozess auftretenden Stoffschluss durch eine zusätzlich

ANWENDUNGEN

Extrusionsverfahren werden häufig zur Erzeugung von Konzeptmodellen, Design- oder Funktionsprototypen eingesetzt. Mit Hilfe nachgeschalteter Abformverfahren werden Extrusionsverfahren jedoch auch zur Erzeugung serienidentischer Bauteile oder Werkzeugmuster eingesetzt. Beispiele industrieller Umsetzungen des Extrusionsverfahrens liefert Tab. A-6.

Tab. A-6: Beispiele industrieller Extrusionsverfahren

Bezeichnung	Firma	Schichtdicken [mm]	max. Bauraum (B×T×H) [mm]	Materialien
Fused Depos. Modeling (FDM)	Stratasys Inc. (USA)	0,127 – 0,33	600 × 500 × 600	ABS, PC
Wax Printing	SolidScape Inc. (USA)	0,013 – 0,127	305 × 150 × 150	propriet. Wachs
Multi-Jet Modeling	3D Systems (USA)	Herstellung der ThermoJet-Anlagen wurde eingestellt (siehe auch Tab. A-3).		

3D-Druck-Verfahren

Im Gegensatz zu den Extrusionsverfahren wird hier nicht aufgeschmolzenes Baumaterial abgelegt, sondern Pulver/Granulat durch gezieltes Aufbringen eines flüssigen Bindemittels verfestigt (Abb. A-7). Ein Druckkopf mit einer elektrostatischen Düse sorgt für die Konturierung der Bauteilquerschnitte durch einen punktwise ausgeführten Bindemittelauftrag.

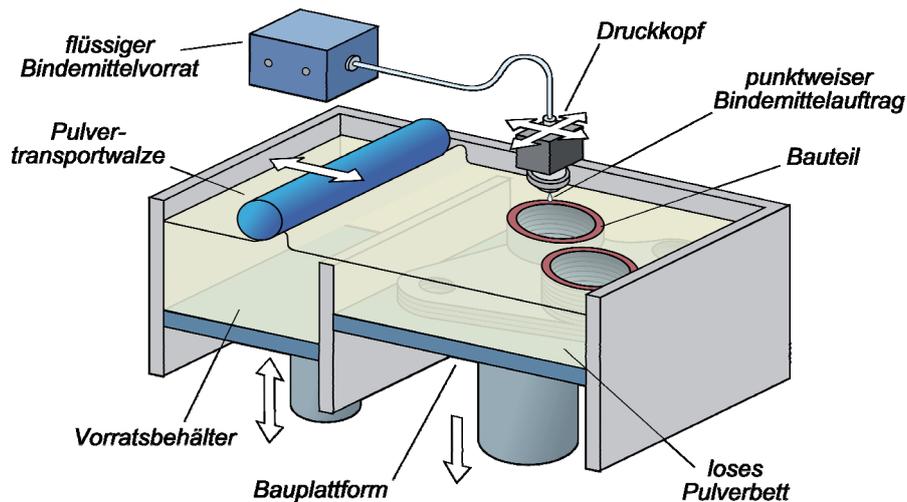


Abb. A-7: Verfahrensprinzip der 3D-Druck-Verfahren am Beispiel 3DP

Die erreichbare Festigkeit ist nach Abschluss des Druckprozesses relativ gering, so dass eine anschließende Erwärmung des Bauteils zur vollständigen Aushärtung notwendig ist.

VORTEILE

- Die Materialpalette ist theoretisch unbegrenzt [Geb07]. Entscheidend ist die Zusammensetzung des Bindematerials. Hierdurch eröffnen sich Möglichkeiten des Einsatzes anforderungsgerechter Composites.
- Das Verfahrensprinzip gestattet theoretisch den Einsatz verschiedener Pulver von Schicht zu Schicht oder sogar innerhalb einer Schicht. Hierdurch können Bauteile mit lokal anisotropen Eigenschaften (*Graded Materials*) entstehen (z. B. Texturen, Farbverläufe, o. ä.).
- Zur Veränderung mechanischer Eigenschaften ist eine Infiltration als Nachbehandlung möglich. Im Übrigen sind alle materialtypischen Folgeverfahren anwendbar.

NACHTEILE

- 3D-Druck-Verfahren stellen ein zweistufiges Verfahren dar, da zur Steigerung der Festigkeit der Grünling nachgehärtet werden muss.
- Je nach verwendetem Material ist die Oberflächenqualität eher gering im direkten Vergleich zu Polymerisationsverfahren.

ANWENDUNGEN

3D-Druck-Verfahren werden bei kunststoffbasierten Materialien zur Erzeugung von Konzept- und Feingussmodellen eingesetzt. Da metallische Werkstoffe ebenfalls bei diesem Verfahren anwendbar sind, findet dieses Verfahren auch vermehrt Anwendung zur Herstellung von Werkzeugen oder von Bauteilen für den direkten Einsatz (Rapid Manufacturing). Beispiele industrieller Umsetzungen des 3D-Druck-Verfahrens liefert Tab. A-7.

Tab. A-7: Beispiele industrieller 3D-Druck-Verfahren

Bezeichnung	Firma	Schichtdicken [mm]	max. Bauraum (B×T×H) [mm]	Materialien
3D Printing (3DP)	Z Corporation (USA)	0,076 – 0,254	500 × 600 × 400	Composite
Direct Metal Printing	ProMetal (DE)	0,05 – 0,2	50 × 40 × 50	Stahl, Bronze, Gold
3D-Drucken	Voxeljet Techn. (DE)	0,1 – 0,15	850 × 450 × 500	propriet. PMMA
Direct Shell Prod. Casting	Soligen Techn. (USA)	0,12 – 0,18	355 × 355 × 455	Aluminium

Zukünftige Verfahren

Während viele der in den letzten Jahren entwickelten Verfahren es kaum über das Entwicklungsstadium hinaus geschafft haben oder ihr Einsatz auf Nischenanwendungen begrenzt blieb, sind dennoch Trends der zukünftigen Verfahrensverbesserungen oder Neuentwicklungen erkennbar, die es für eine zukunftsorientierte Gestaltung der Prozessvorbereitung und Prozessdurchführung zu berücksichtigen gilt. Ohne auf einzelne Verfahren einzugehen, lässt sich insgesamt festhalten, dass alle Bestrebungen auf die Verbesserung der Prozessqualität und Prozesswirtschaftlichkeit abzielen. Dies schließt auch die Neu- und Weiterentwicklung sowie Qualifizierung verarbeitbarer Werkstoffe ein. Des Weiteren führt die im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren zunehmende Gestaltungsfreiheit zur Erzeugung von Endprodukten zu einem Anstieg der Bauteilkomplexität. Hiermit einhergehend nehmen die Qualitätsanforderungen stetig zu. Insbesondere die Verbesserung der Oberflächenqualität steht im Fokus zukünftiger Entwicklungen.

Veröffentlichungen

Zeitschriften

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Datenschnittstellen zum Rapid Manufacturing - Teil2*. In: CAD-CAM Report, (2009), Nr. 6, S. 58-61

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Datenschnittstellen zum Rapid Manufacturing - Teil1*. In: CAD-CAM Report, (2009), Nr. 5, S. 62-65

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik*. In: RTejournal, (2008), Nr. 5

DANJOU, S.; LUPA, N.; KÖHLER, P.: *Feature-basierende Produktmodellierung zur Sicherung des Wissenstransfers*. In: CAD-CAM Report, (2008), Nr. 2, S. 50-54

DANJOU, S.; LUPA, N.; KÖHLER, P.: *Einsatz KBE-basierter Konstruktionsfeature*. In: Konstruktion, VDI-Verlag, Bd. 11 (2008), S. 56-60

DANJOU, S.; LUPA, N.; KÖHLER, P.: *Approach for Automated Product Modeling Using Knowledge-Based Design Features*. In: Computer-Aided Design and Applications, Bd. 5 (2008), Nr. 5, S. 622-629

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Challenges for Design Management*. In: Computer-Aided Design and Applications, Bd. 4 (2007), Nr. 1-4, S. 109-116

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Herausforderungen an das Konstruktionsmanagement*. In: Konstruktion, VDI-Verlag, Bd. 10 (2006), S. 78-82

Tagungen

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Anwendung geometrischer Algorithmen zur Optimierung triangulierter 3D-Modelle für generative Fertigungsprozesse*. In: Tagungsband des 12. Anwendungsbezogenen Workshops zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten (3D-NordOst), Berlin, 2009

KÖHLER, P.; DANJOU, S.; HUMPA, M.: *Generierung von Bauteilgeometrien mit besonderen Krümmungs- und Kurveneigenschaften*. In: Tagungsband des 12. Anwendungsbezogenen Workshops zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten (3D-NordOst), Berlin, 2009

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Multi-objective Optimization of Part Orientation to Improve Process Planning in RM*. In: Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 2009

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Determination of Optimal Build Direction for Different Rapid Prototyping Applications*. In: Proceedings of the 14th European Forum on Rapid Prototyping, Ecole Centrale Paris, 2009

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Multi-objective Optimization of Part Orientation for Non-Convex Parts in Rapid Technology Applications*. In: Proceedings of the 10th National Conference on Rapid Design, Prototyping & Manufacture, Bucks New University, High Wycombe, UK, 2009

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RP-Kette*. In: Tagungsband der Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2009

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik*. In: Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2008

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Interface Issues of Data Exchange between CAD and Rapid Manufacturing Applications*. In: Proceedings of the 32nd Japan RP Symposium, Tokyo, JP, 2008

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Interface Considerations Concerning the Processing of CAD Data for Rapid Technology Applications*. In: Proceedings of the 9th National Conference on Rapid Design, Prototyping & Manufacture, Lancaster University, Bailrigg, Lancaster, UK, 2008

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Bridging the Gap between CAD and Rapid Technologies – Exigency of Standardized Data Exchange*. In: 12th European Forum on Rapid Prototyping, Ecole Centrale Paris, 2008

DANJOU, S.; LUPA, N., KÖHLER, P.: *Approach for Automated Product Modeling Using Knowledge-Based Design Features*. In: Proceedings of the CAD'08 - International CAD Conference and Exhibition, Orlando, FL, USA, 2008

DANJOU, S.; LUPA, N.; KÖHLER, P.: *Approach for a Modular Knowledge-Based CAD Modeling Process*. In: Proceedings of the 18th CIRP Design Conference, Enschede, NL, 2008

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Challenges for Design Management*. In: Proceedings of the CAD'07 - International CAD Conference and Exhibition, Honolulu, HI, USA, 2007

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Ansätze zur RP-gerechten Gestaltung funktionaler Prototypen in parametrischen CAD-Systemen*. In: Rapid.Tech - Anwendertagung und Fachausstellung für Rapid-Technologie, Erfurt, 2006

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Integrierte Produktentwicklung - Daten- und Wissensmanagement in der Konstruktion*. In: Mechanical Days – Anwendertagung für CAD Design, Reichshof-Wildberghütte, 2005

Fachbücher

KÖHLER, P. (Hrsg.); DANJOU, S. et al.: *Pro/ENGINEER-Praktikum - Arbeitstechniken der parametrischen 3D-Konstruktion mit Wildfire 5.0*. 5. erw. Aufl., Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2010

DANJOU, S.; KÖHLER, P.: *Multi-Objective Optimization of Part Orientation to Improve Process Planning in RM*. In: P. Bártolo et al. (Hrsg.): *Innovative Developments in Design and Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, London: Taylor & Francis, 2009, S. 447-452

KÖHLER, P. (Hrsg.); DANJOU, S. et al.: *Pro/ENGINEER-Praktikum - Arbeitstechniken der parametrischen 3D-Konstruktion mit Wildfire 3.0*. 4. erw. Aufl., Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2006

KÖHLER, P. (Hrsg.); DANJOU, S. et al.: *Pro/ENGINEER-Praktikum - Arbeitstechniken der parametrischen 3D-Konstruktion mit Wildfire*. 3. erw. Aufl., Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2003

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Stéphane Danjou
Anschrift: Kämpchenstraße 18
45468 Mülheim an der Ruhr
Geburtsdatum: 14. Juni 1974
Geburtsort: Versailles (FR)
Nationalität: deutsch / französisch

Berufstätigkeit und Berufsausbildung

10/2010 – heute Technischer Leiter bei MSK Verpackungs-Systeme GmbH, Kleve
06/2010 – 09/2010 Assistenz der GL bei MSK Verpackungs-Systeme GmbH, Kleve
06/2004 – 05/2010 Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Produkt Engineering der
Universität Duisburg-Essen, Professur für Rechnereinsatz in der Kon-
struktion, Leitung Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler
03/1999 – 05/2004 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Produkt Engineering, Pro-
fessur für Rechnereinsatz in der Konstruktion
10/1997 – 05/2004 Studium des Maschinenbaus an der Universität Duisburg-Essen, Stu-
dienrichtung Konstruktionstechnik, Abschluss: Dipl.-Ing.
09/1997 – 03/2002 Technischer Zeichner bei Siemens AG Power Generation (KWU),
Mülheim an der Ruhr im Bereich Brennerkonstruktion, Gasturbinen-
und GUD-Anlagen
09/1994 – 06/1997 Ausbildung zum Technischen Zeichner bei Siemens AG Power Gene-
ration (KWU), Mülheim an der Ruhr

Wehrdienst

07/1993 – 06/1994 Fernmeldebataillon 840 in Essen-Kray

Schulausbildung

1984 – 1993 Kleist-Gymnasium in Mülheim an der Ruhr, Abitur
1980 – 1984 Grundschule Filchnerstraße in Mülheim an der Ruhr

