

Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch
CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Alexander Matthias Martha
aus
Düsseldorf

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler
Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote

Tag der mündlichen Prüfung: 23.11.2015

Kurzfassung

Die Verbreitung von 3D-Druck-Anwendungen im Bereich der Home- und Office-User führt zu einer gesellschaftlichen und medialen Fokussierung aller Technologien zur additiven Bauteilherstellung. Auch für die professionelle Anwendung dieser Technologien als Fertigungsverfahren werden die Möglichkeiten als grenzenlos beschrieben. Bei weitergehender Auseinandersetzung wird jedoch schnell festgestellt, dass sich additive Fertigungsverfahren zwar prinzipiell zur Herstellung von Produkten eignen, eine umfassende Einbindung in bekannte Betriebs- und Entwicklungsabläufe jedoch noch nicht gegeben ist. Ziel der Arbeit ist es, eine umfassende CAD-CAM-Prozesskette für additive Fertigungsverfahren zu entwickeln. So sollen durch bessere Integration die Akzeptanz, Effizienz und Qualität des Produktentwicklungsprozesses gesteigert werden. Dazu wird ein Ansatz zur Erweiterung gängiger 3D-CAD-Systeme entwickelt. Hiermit sollen die für die additive Fertigung typischen Eigenschaften direkt bei der Bauteilgestaltung verfügbar gemacht werden. Die Integration resultiert letztendlich in der Bereitstellung von Schichtdaten im eigens entwickelten Schichtdatenformat Additive Manufacturing Layer File Format (AMLF). Die Umsetzung erfolgt durch umfassende Nutzung von Systems Engineering Methoden. Als Demonstrator für die Erfassung von Anforderungen und die Beschreibung von Teillösungen wird die gekühlte Leitschaufel einer Gasturbine gewählt.

Abstract

The growing use of 3D printing applications in the home and office environment increases media coverage of the related additive manufacturing technologies. In this regard, the possibilities for the professional utilization of these technologies are described as limitless. However, a closer look quickly reveals that additive manufacturing technologies are in principle suitable for manufacturing whereas a full integration in the known development processes is not given yet. Therefore, the aim of this work is the description of a comprehensive CAD-CAM-process chain for additive manufacturing. As a result a better acceptance, efficiency and quality of the product development process should be achieved. For this purpose, an approach for the enhancement of standard 3D-CAD-systems is developed. This approach provides additive manufacturing specific properties and features during the part design process, which eventually results in layer data that is exchanged with the self-developed Additive Manufacturing Layer File Format (AMLF). The implementation is carried out by the use of systems engineering methods. For an extended requirements review and the description of partial solutions, a cooled stationary blade of a gas turbine is chosen as demonstrator.

Inhalt

Kurzfassung	i
Abkürzungen	vi
Abbildungen und Tabellen	vii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Additive Fertigung	5
2.1 Begriffe und Definitionen	5
2.2 Der Prozess der additiven Fertigung	6
2.2.1 Pre-Prozess	6
2.2.1.1 Datenaustausch und Datenaufbereitung	7
2.2.1.2 Stützkonstruktionen	11
2.2.1.3 Simultane Fertigung und Bauteilanordnung	13
2.2.1.4 Schichtdatengenerierung	16
2.2.2 In-Prozess	19
2.2.3 Post-Prozess	20
2.2.4 Nach- und Weiterbearbeitung	21
3 Modellbasierte Lösungsmethodik	23
3.1 Systems Engineering	23
3.1.1 Systemarchitektur	23
3.1.2 Systemanforderungen	23
3.1.3 Systemverhalten	24
3.2 SysML	24
3.2.1 Gemeinsamkeiten von SysML und UML	25
3.2.2 Diagramme in SysML	26
3.2.2.1 Blockdefinitionsdiagramm	27
3.2.2.2 Internes Blockdiagramm	28
3.2.2.3 Zusicherungsdiagramm	28
3.2.2.4 Paketdiagramm	29
3.2.2.5 Anforderungsdiagramm	29
3.2.2.6 Anwendungsfalldiagramm	30
3.2.2.7 Aktivitätsdiagramm	31
3.2.2.8 Zustandsdiagramm	32
3.2.2.9 Sequenzdiagramm	32
3.3 Modellstruktur des Lösungskonzepts	32

4	Systematisierung und Vernetzung der Anforderungen.....	34
4.1	Problembeschreibung der CAD-CAM-Prozesskette.....	34
4.2	Anforderungen an eine bedarfsgerechte CAD-CAM-Prozesskette.....	35
4.2.1	Anforderungen an die CAD-CAM-Software	36
4.2.2	Anforderungen an AF-Datenformate.....	39
4.3	Demonstrator Gasturbinenleitschaufel.....	40
4.3.1	Eigenschaften der Gasturbinenleitschaufel.....	40
4.3.2	Modellierung der Demonstrator-Anforderungen	42
4.4	Grobgestaltung von Anwendungsfällen.....	43
5	Lösungsansätze für identifizierte Anforderungen und Anwendungsfälle	45
5.1	Bauteilorientierung- und Anordnung.....	45
5.1.1	Bauteilorientierung.....	45
5.1.2	Anordnen von Bauteilen für die simultane Fertigung	48
5.1.2.1	Zweidimensionale Verschachtelungsprobleme	50
5.1.2.2	Dreidimensionale Packungsprobleme.....	53
5.1.2.3	Softwarelösungen für das Verschachteln und Packen	55
5.1.3	Auswahl der Lösungsansätze zur Orientierung und Verschachtelung.....	56
5.2	Generierung von Stützkonstruktionen	57
5.2.1	Ansätze zum Generieren von SK.....	57
5.2.1.1	Stützkonstruktionen facettenbasiert erzeugen.....	57
5.2.1.2	Minimierung von Stützkonstruktionen und eingeschlossenem Volumen.....	59
5.2.1.3	Featurebasierte Erzeugung von Stützkonstruktionen.....	60
5.2.1.4	Substitution von Stützkonstruktionen durch optimierte Gestaltung.....	60
5.2.1.5	Optimierte Gestaltung von Stützkonstruktionen.....	61
5.2.2	Softwarelösungen zum Generieren von Stützkonstruktionen	63
5.2.3	Auswahl der Lösungsansätze zur Erzeugung von Stützkonstruktionen	64
5.3	Generierung von Schichtdaten.....	65
5.3.1	Uniforme Schichtdatengenerierung.....	66
5.3.2	Adaptive Schichtdatengenerierung und Hülle-Kern-Ansätze	67
5.3.2.1	Inkrementelle Ansätze zur Schichtzerlegung	68
5.3.2.2	Top-down- und Bottom-up-Ansätze	72
5.3.3	Direkte Schichtdatengenerierung.....	74
5.3.4	Softwarelösungen für die Erzeugung von Schichtdaten	77
5.3.5	Auswahl der Lösungsansätze zur Erzeugung von Schichtdaten....	77

5.4	Heterogene Material- und Bauteileigenschaften	78
5.4.1	Ansätze zur Abbildung von heterogenen Materialeigenschaften ..	79
5.4.2	Softwarelösungen zur Modellierung von heterogenen Bauteileigenschaften	81
5.4.3	Auswahl der Lösungsansätze zur Abbildung von heterogenen Bauteileigenschaften	81
5.5	AF-Software Entwicklungstrend	82
6	Modellbildung und exemplarische Umsetzung	83
6.1	Integrationsstufe 1	85
6.1.1	Identifikation von fertigungstechnischen Randbedingungen	87
6.1.2	Konzept zum Datenaustausch	88
6.1.3	Fertigungsgerechter Modellaufbau	91
6.1.4	Absicherung der fertigungsgerechten Gestaltung	95
6.1.5	Exemplarische Umsetzung der Integrationsstufe 1	100
6.1.5.1	Additive Manufacturing Parameters (AMP)	100
6.1.5.2	Additive Manufacturing CAD Tool (AMC)	103
6.2	Integrationsstufe 2	113
6.2.1	Gestaltung mit optimierten AF-Features	113
6.2.2	Abbildung von heterogenen Material- und Bauteileigenschaften	118
6.2.2.1	Materialzuweisung im CAD-Modell	119
6.2.2.2	Gradierte Materialeigenschaften	121
6.2.2.3	Gitter- und Leichtbaustrukturen	123
6.2.3	Direkte Schichtdatengenerierung	127
6.2.3.1	Schichtdatenformat AMLF	127
6.2.3.2	Direkte Schichtdatengenerierung	133
6.3	Integrationsstufe 3	138
6.3.1	Bauteilorientierung- und Anordnung	139
6.3.2	Generierung von Stützkonstruktionen	140
6.3.3	Erzeugung der Fertigungsdaten	141
6.4	Übertragbarkeit des Ansatzes bei abweichenden Software-Konstellationen	142
7	Zusammenfassung und Ausblick	143
	Literaturverzeichnis	147
8	Anhang	163
	Veröffentlichungen	181
	Lebenslauf	183

Abkürzungen

2,5D	Zweieinhalbdimensional	NURBS	Non-uniform rational
3D	dreidimensional		B-Spline
act	Aktivitätsdiagramm	OMG	Object Management
AF	additive Fertigung, additive(s) Fertigungsver- fahren	par	Zusicherungsdiagramm
AMC	Additive Manufacturing CAD-Tool	pkg	Paketdiagramm
AMF	Additive Manufacturing File Format	req	Anforderungsdiagramm
AMLF	Additive Manufacturing Layer File Format	RM	Rapid Manufacturing
AMP	Additive Manufacturing Parameters	RP	Rapid Prototyping
API	Application Programming Interface	sd	Sequenzdiagramm
BB	Boundingbox	SK	Stützkonstruktionen
bdd	Blockdefinitions- diagramm	SQuaRE	Software product Quality Requirements and Evaluation
B-Rep	Boundary Representation	STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
CAD	Computer Aided Design	STL	Surface Tessellation Lan- guage
CAM	Computer Aided Manufacturing	stm	Zustandsdiagramm
CHC	Cusp Height Concept	SysML	OMG Systems Modeling Language
CSG	Constructive Solid Geometry	uc	Anwendungsfalldiagramm
FDM	Fused Deposition Modeling	UDE	Universität Duisburg-Essen
ibd	Internes Blockdiagramm	UDF	User Defined Feature
IGES	Initial Graphics Exchange Specification	UML	Unified Modeling Language
JT	Jupiter Tessellation	XML	Extensible Markup Language
NFP	Nofit Polygon		

Abbildungen und Tabellen

Abb. 2-1: Prozess der additiven Fertigung (vereinfacht)	6
Abb. 2-2: STL-Dateierzeugung aus dem CAD-Bauteil	7
Abb. 2-3: Sehnenhöhe bei der STL-Erzeugung aus dem CAD-System.....	9
Abb. 2-4: Tetraeder und Dreieck mit Vertex-Normalen im AMF-Format	10
Abb. 2-5: Klassifizierung von Stützkonstruktionen	12
Abb. 2-6: Up- und Downskin-Flächen nach [VDI3405-3]	13
Abb. 2-7: Wirtschaftliche Bauteilreihenfolge durch Zeitersparnis nach [MaKö11]	14
Abb. 2-8: Klassifizierung der Verschachtelungs- und Packungstypen.....	15
Abb. 2-9: Erzeugen von Schichtdaten basierend auf STL.....	17
Abb. 2-10: Spitzenhöhe (cusp height) und Treppenstufeneffekt	18
Abb. 2-11: Prinzipdarstellung Laser-Strahlschmelzen.....	19
Abb. 2-12: Zustände vor und nach dem Post-Prozess	20
Abb. 3-1: Klassen und Objekte in UML-Darstellung.....	25
Abb. 3-2: Taxonomie der SysML Diagramme.....	26
Abb. 3-3 SysML Blockdefinitionsdiagramm	27
Abb. 3-4: SysML internes Blockdiagramm	28
Abb. 3-5: SysML parametrisches Zusicherungsdiagramm.....	29
Abb. 3-6: SysML Anforderungsdiagramm.....	30
Abb. 3-7: SysML Anwendungsfalldiagramm.....	30
Abb. 3-8 SysML Aktivitätsdiagramm	31
Abb. 3-9: Modellstruktur als SysML Paketdiagramm	33
Abb. 4-1: Aktivitätsdiagramm bisheriger AF-CAD-CAM-Prozesse	35
Abb. 4-2: Anwendungsfalldiagramm CAD-CAM-Prozesskette (vereinfacht)	35
Abb. 4-3: Anforderungsdiagramm für die Erzeugung der Fertigungsdaten	36
Abb. 4-4: Anforderungen an AMF nach Lipson und Hiller [LiHi04]	39
Abb. 4-5: Blockdefinitionsdiagramm einer Gasturbine (vereinfacht).....	40
Abb. 4-6: Turbinen-Leitschaufel (schematisch).....	41
Abb. 4-7: Kühlverfahren für Turbinenschaufeln	42
Abb. 4-8: Anforderungsdiagramm für die Leitschaufel.....	43
Abb. 4-9: Lösungskonzept als Anwendungsfalldiagramm.....	44
Abb. 5-1: Gegenüberstellung gemessene und berechnete Oberflächengüte [ReMa13]	46
Abb. 5-2: Testfall Wirtschaftlichkeit nach [KöWi15]	47
Abb. 5-3: Verschachteln von Laser-Strahlschmelz-Bauteilen.....	49
Abb. 5-4: Packen von Laser-Sinter-Bauteilen.....	50
Abb. 5-5: Durchdringungsprüfung nach [SeFa86], Bild nach [BeOl08].....	51
Abb. 5-6: Nofit Polygon nach [BeOl08]	52
Abb. 5-7: Paletten-Beladungsproblem (Bild: [Sc08]).....	53

Abb. 5-8 Softwarearchitektur des Optimierers nach [GoPa08].....	54
Abb. 5-9: netfabb Automatic Packing (Bild: [Ne15a]).....	55
Abb. 5-10: Stützpolygone nach [MaJa99]	59
Abb. 5-11: Gestaltoptimierung nach [AlDu97].....	61
Abb. 5-12: Funktionen zur Beschreibung von Stützkonstruktionen (Bild: [StHa13]) .	62
Abb. 5-13: Gerüstartige Stützkonstruktionen (Bild: [DuHe14]).....	63
Abb. 5-14: Bauteil mit baumartigen SK (Bild: [Di13], Materialise).....	63
Abb. 5-15: Stützkonstruktionen für das 3D-Drucken mit <i>Adobe Photoshop CC</i>	64
Abb. 5-16: Prinzipien der Schichtzerlegung	65
Abb. 5-17: Inklusionsbeziehungen bei der Schichtdatengenerierung nach [Sc02]	67
Abb. 5-18: Geometrische Zusammenhänge am Fehlerdreieck.....	68
Abb. 5-19: Geometriemerkmale nach [TaFa98]	70
Abb. 5-20: Region-based adaptive slicing (RAS) nach [MaKu99]	70
Abb. 5-21: Lokale adaptive Schichtzerlegung nach [TyBø98]	73
Abb. 5-22: Konturenversatz in einer Schicht nach [SaHo97]	73
Abb. 5-23: Non-manifold Problematik bei B-Rep Modellen.....	74
Abb. 5-24: Anwendung des CHC auf die direkte Geometrie nach [YaZh04].....	75
Abb. 6-1: Modulare Integration in der CAD-CAM-Umgebung als Paketdiagramm ...	83
Abb. 6-2: In der ersten Integrationsstufe enthaltene Anwendungsfälle.....	84
Abb. 6-3: In der zweiten und dritten Integrationsstufe enthaltene Anwendungsfälle..	85
Abb. 6-4: Blockdefinitionsdiagramm der ersten Integrationsstufe.....	86
Abb. 6-5: Zuordnung der Anforderungen an die erste Integrationsstufe.....	87
Abb. 6-6: Detaillierung der Anforderungen zur Funktionsbeschreibung	88
Abb. 6-7: Anwendungsfalldiagramm zur Nutzung von AMP	88
Abb. 6-8: AMP-XML im XML-Notepad.....	89
Abb. 6-9: Datenaustausch mit AMP-XML	90
Abb. 6-10: Differenzierung von Grob- und Feingestaltung	92
Abb. 6-11: Modellierungsmethodik als Aktivitätsdiagramm.....	94
Abb. 6-12 Ermittlung der Bauteilabmessungen mit <i>PTC Creo 3.0</i>	96
Abb. 6-13 3D-Wanddickenprüfung mit <i>PTC Creo 3.0</i>	97
Abb. 6-14 Optimierte Gestaltung zur Vermeidung von Stützkonstruktionen	98
Abb. 6-15: Aktivitätsdiagramm zur Absicherung der fertigungsgerechten Gestaltung	99
Abb. 6-16: AMP Registerkarte „Allgemeine Informationen“	101
Abb. 6-17: AMP Probenkörper des RTC Duisburg.....	102
Abb. 6-18 AMC <i>Creo</i> Multifunktionsleiste	103
Abb. 6-19: AMC <i>Inventor</i> Multifunktionsleiste	103
Abb. 6-20: Neuorientierung des Bauteils durch Parameter im <i>Creo</i> -Startmodell	104
Abb. 6-21: Blockdefinitionsdiagramm des <i>Creo</i> -Startmodells.....	105
Abb. 6-22: Vorgehensweise beim STL-Export	106
Abb. 6-23: AMF-Klassenstruktur.....	107

Abb. 6-24: AMF-Exportdialog.....	107
Abb. 6-25: Schnittdickenprüfung mit <i>Creo 3.0</i>	109
Abb. 6-26: Prüfung auf Stützkonstruktionen mit <i>Final Surface</i>	110
Abb. 6-27: Bereichsweise-adaptive Schichtzerlegung mit <i>Final Surface</i>	111
Abb. 6-28: Erweiterung von AMT mit einer Datenbank zwecks Wissensintegration	114
Abb. 6-29: Blockdefinitionsdiagramm des AF-Zylinder-Features.....	116
Abb. 6-30: Aktivitätsdiagramm zur Ablaufbeschreibung der AF-Feature-Nutzung ..	117
Abb. 6-31: Erzeugen von Bearbeitungszugaben durch Aufdicken	118
Abb. 6-32: Strukturierung der Lösung zur Abbildung von Materialeigenschaften.....	119
Abb. 6-33: Top-down-Ablauf der featurebasierten Materialzuweisung	119
Abb. 6-34: Featurebasierte und verbundmodellbasierte Materialzuweisung.....	120
Abb. 6-35: Bottom-up-Ablauf der verbundmodellbasierten Materialzuweisung.....	121
Abb. 6-36: AF-Materialfeature mit kontinuierlicher Änderung der Dichte.....	122
Abb. 6-37: Negativdarstellung gefertigter Filterstrukturen nach [SeMa12]	123
Abb. 6-38: Parameter zur Beschreibung von porösen Gitterstrukturen	124
Abb. 6-39: Aufbau einer Filterstruktur in der Datenbank.....	125
Abb. 6-40: Leichtbau durch flächenbasierte AF-Features	126
Abb. 6-41: AMLF-Struktur.....	127
Abb. 6-42: Beschreibung der Materialien mit AMLF.....	128
Abb. 6-43: Beschreibung der Objekte mit AMLF	129
Abb. 6-44: Beschreibung der Anordnung mit AMLF	132
Abb. 6-45: Schnittkurvengenerierung und Export mit <i>Creo</i>	133
Abb. 6-46: CAD-basierte Schichtdatengenerierung.....	134
Abb. 6-47: Fehlermaß c zur Quantifizierung der Abweichung	134
Abb. 6-48: Approximation der Schnittkontur durch Polylinien.....	135
Abb. 6-49: Verarbeitung der Schnittkonturen als Aktivitätsdiagramm.....	136
Abb. 6-50: Materialbereichsweise Schichtdatenerzeugung	136
Abb. 6-51: Bereichsweise-adaptive Schichtdatenerzeugung	138
Abb. 6-52: Pakete der AMC-CAD-CAM-Gesamtlösung	139
Abb. 6-53: Automatische Packungsoptimierung mit <i>SolidWorks</i>	140
Abb. 6-54: Erzeugung von featurebasierten Stützkonstruktionen	141
Abb. 8-1: Aktivitätsdiagramm der CAD-CAM-Prozesskette	163
Abb. 8-2: Bauteilgestaltung als Anwendungsfalldiagramm	164
Abb. 8-3: Erzeugung der Fertigungsdaten als Anwendungsfalldiagramm	165
Abb. 8-4: Softwareanforderungen nach SQuaRE als Anforderungsdigramm	166
Abb. 8-5: Anforderungen an die AF-Prozesskette.....	167
Abb. 8-6: Anforderungsdigramm nach den Anforderungen von Lipson und Hiller	168
Abb. 8-7: Anforderungsdigramm für Leitschaukel	169
Abb. 8-8: Lösungskonzept als Anwendungsfalldiagramm.....	170
Abb. 8-9: Schnittdickenprüfung mit <i>PTC-Creo</i>	171

Abb. 8-10: AMP-Musterbericht Seite 1 von 2	172
Abb. 8-11: AMP-Musterbericht Seite 2 von 2	173
Abb. 8-12: AMP Registerkarte „Allgemeine Informationen“	174
Abb. 8-13: AMP Registerkarte „Prozessinformationen“	174
Abb. 8-14: AMP Registerkarte „Geometrie“	175
Abb. 8-15: AMP Tabellenfunktion.....	175
Abb. 8-16: AMP Registerkarte „Weitere Hinweise“	176
Abb. 8-17: AMP Registerkarte „Datenaustausch und Info	176
Abb. 8-18: AMLF-Beispielbauteil und Beispieldatei	177
Tabelle 1: Auswirkungen von Änderungen der Modellgenauigkeit.....	94

1 Einleitung

Die Verbreitung von 3D-Druck-Anwendungen im Bereich der Home- und Office-User führt zu einer gesellschaftlichen und medialen Fokussierung aller Technologien zur additiven Bauteilherstellung. Auch für die professionelle Anwendung dieser Technologien als Fertigungsverfahren werden die Möglichkeiten als grenzenlos beschrieben. Die als nahezu magisch erfahrene Erzeugung von komplexen Geometrien aus flüssigen, pulverförmigen oder festen Materialien ist zunächst für jeden faszinierend, der diese Verfahren das erste Mal erlebt [CaWi11], [EiLa13], [GeFa14].

Bei weitergehender Auseinandersetzung wird jedoch schnell festgestellt, dass sich additive Fertigungsverfahren (AF) zwar prinzipiell zur Herstellung von Produkten eignen – eine umfassende Einbindung in bekannte Betriebs- und Entwicklungsabläufe jedoch noch nicht gegeben ist [La13], [Ru14]. Dies ist insbesondere durch die Andersartigkeit dieser Technologie im Vergleich zu den bekannten, konventionellen Fertigungsverfahren begründet. Hieraus folgt auch die Tatsache, dass aufgrund von mangelhafter Kommunikation der Möglichkeiten und Grenzen dieser Fertigungsverfahren Bauteile größtenteils mit dem Fokus auf ein herkömmliches Verfahren gestaltet werden, dann jedoch die additive Fertigung erfolgt. Konstrukteure legen ihre Bauteile gerne nach den gelehrten und gelernten Grundsätzen von z. B. gieß- oder zerspanungsgerechter Gestaltung aus. Die Ergebnisse sind folglich oftmals nicht optimal mit additiven Fertigungsverfahren abbildbar. Aus der Historie des Rapid Prototyping heraus werden die Verfahren aber oft noch so verstanden, dass diese herkömmliche Vorgehensweise bei der Gestaltung genau der richtige Weg ist. Hier muss unbedingt ein Umdenken erfolgen, um diese Technologie erfolgreich als eigenständiges Fertigungsverfahren zu etablieren [Ro13], [VaVi12].

Wesentliches Alleinstellungsmerkmal additiver Fertigungsverfahren ist die werkzeuglose, schichtweise Fertigung. Der allgemein bekannte Grundsatz, dass zunehmende Geometriekomplexität mit steigenden Kosten einhergeht, verliert hier seine Gültigkeit [EiLa13]. Ebenso können Änderungen noch bis kurz vor der Bauteilfertigung erfolgen, ohne dass die Kosten für das Endprodukt steigen müssen. Dies birgt somit ein hohes Potenzial für eine dynamische Produktentwicklung [Eh13].

Einschränkungen sind durch die derzeit beschränkte Materialpalette und die, bedingt durch den schichtweisen Aufbau, i. d. R. anisotropen Materialeigenschaften gegeben. Darüber hinaus fehlen aussagekräftige Ansätze zur Qualitätssicherung. Gerade bei den metallverarbeitenden Verfahren, wie Laser- oder Elektronen-Strahlschmelzen, können selbst kleinste, fertigungsbedingte Fehler im resultierenden Gefüge zu Rissen und somit zum Bauteilversagen führen. Darüber hinaus stehen dem Konstrukteur nicht alle Freiheiten bei der Gestaltung der Geometrie zur Verfügung. So ist bei vielen industrie-

relevanten Verfahren Zusatzgeometrie in der Form von Stützkonstruktionen erforderlich, um die Stabilität und Wärmeabfuhr während des Bauprozesses zu sichern. Stützkonstruktionen beeinträchtigen direkt die Qualität der betroffenen Oberflächen. Diesbezüglich muss bei der Gestaltung auch berücksichtigt werden, dass diese Zusatzgeometrie wieder mechanisch entfernt werden muss. Hier ist, wie bei konventionellen Verfahren üblich, die Werkzeugzugänglichkeit sicherzustellen. Zusätzlich müssen Spann- und Werkzeugansatzflächen für die Nachbearbeitung vorgesehen werden. Diese kurz beschriebenen Faktoren sind jedoch nur die Spitze des Eisbergs. Daher ist es unbedingt erforderlich, den Produktentwicklern konstruktionsbegleitende Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, die eine Gestaltung im Hinblick auf AF ermöglichen. Zudem ist es erforderlich, dass die gesammelten Informationen innerhalb der Prozesskette jederzeit verfügbar sind. Da sich erfahrungsgemäß keine allgemeinen Aussagen zu allen additiven Fertigungsverfahren treffen lassen, müssen die Information letztlich anlagenabhängig erfasst, dokumentiert und zur Verfügung gestellt werden.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Im Gegensatz zu der für AF herkömmlichen Vorgehensweise, die CAD-Modelle als STL-Daten zu exportieren und dann in der prozessvorbereitenden AF-Software weiter zu verarbeiten, sieht der hier entwickelte Ansatz die Beschreibung einer CAD-CAM-Kopplung vor. Vergleichbar mit bekannten Lösungen für die mechanische Fertigung soll es für die Benutzer möglich sein, alle erforderlichen Schritte der Bauteilkonstruktion und Fertigungsvorbereitung in einer CAD-CAM-Umgebung ohne unnötige Datentransfers durchzuführen. Durch Konzepte zur Wissensintegration wird fertigungsspezifisches Wissen in der zu beschreibenden Softwareumgebung angereichert, was zu einer Optimierung des gesamten Produktentwicklungsprozesses führt.

Der Ansatz schließt somit ein, dass die für die Fertigung relevanten Informationen dem Produktdatenmodell im CAD-Umfeld aufgeprägt werden. Dies betrifft beispielsweise die Bauteilorientierung, gradierte Materialeigenschaften oder Gitterstrukturen und Stützkonstruktionen. Damit wird das CAD-Modell die zentrale Informationsquelle für alle Folgeprozesse. Das demzufolge erforderliche und neu zu entwickelnde Format für den Datenaustausch muss dazu in der Lage sein, die zuvor erzeugten Informationen zu transportieren. Die Herausforderung besteht hier in der Erweiterung der bestehenden Lösungen hin zu einem Format, das neben den reinen Geometrieinformationen auch Metadaten berücksichtigt.

Ziel des Konzepts ist es nicht, die bestehenden AF-Softwarelösungen zu optimieren, sondern basierend auf der Notwendigkeit der Nutzung von spezifischer Software zur Prozesseinrichtung zu untersuchen, wie die bekannten umfangreichen Lösungen in

das Gesamtkonzept integriert werden können. Dementsprechend werden vorhandene Lösungsansätze aus Forschung und Entwicklung ebenfalls implementiert.

Die Lösung wird unter der Nutzung von Systems Engineering Ansätzen mit der Systemmodellierungssprache SysML entwickelt und abgebildet. Zur Veranschaulichung von Lösungsmodulen und der Ergänzung von anwendungsspezifischen Anforderungen wird die gekühlte Leitschaufel einer Gasturbine als Demonstrator ausgewählt. Diesbezüglich ruht der Fokus der Arbeit auf den metallverarbeitenden AF.

1.2 Gliederung der Arbeit

Der systematische Aufbau der Arbeit führt zu einer Gliederung in sieben Kapitel. Nach dieser Einleitung folgt das zweite Kapitel, in dem wesentliche Grundlagen des additiven Fertigungsprozesses erläutert werden. Im Fokus steht hier insbesondere die digitale Prozesskette. So werden grundlegende Ansätze zur Verarbeitung von AF-Daten dargestellt. Das dritte Kapitel beschreibt zusammenfassend die Systems Engineering Vorgehensweise der Nutzung einer modellbasierten Lösungsmethodik. Dabei werden die Grundlagen, welche dem weiteren Verständnis dieser Arbeit dienen, eingeführt. Dies betrifft insbesondere die Beschreibung der verwendeten Diagrammtypen und -Elemente. In Kapitel vier erfolgt eine systematische Vernetzung der Anforderungen. Dazu wird sowohl die Prozesskette als auch der Demonstrator analysiert. Das Ergebnis ist wesentliche Grundlage für das folgende Kapitel fünf. Dieses dient dazu, vorhandene Lösungskonzepte aus Forschung und Entwicklung für die zuvor identifizierten Anforderungen zu ermitteln. Ergänzt wird das Konzept mit den bereits verfügbaren Softwarelösungen, die zur Bearbeitung von Teilaufgaben genutzt werden können. Basierend auf den ermittelten Anforderungen und Teillösungen wird im sechsten Kapitel der Lösungsansatz beschrieben. Hier erfolgt die stufenweise Entwicklung eines Integrationskonzepts, das als Ergebnis beschreiben soll, wie eine umfassende CAD-CAM-Integration erfolgen kann. Abgeschlossen wird die Arbeit im siebten Kapitel mit der Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse und einem Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen.

2 Additive Fertigung

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Grundlagen in Bezug auf additive Fertigungsverfahren beschrieben. Neben den hier genannten Inhalten sind weitere Informationen mit grundsätzlichen und vertieften Prozess- und Verfahrensbeschreibungen in z. B. [Ge13], [Br13], [GiRo10], [ZäHa06] und [VeMa04] enthalten.

2.1 Begriffe und Definitionen

Additive Fertigungsverfahren werden durch das Fügen von Volumenelementen charakterisiert. Diese Vorgehensweise ist neben der subtraktiven und formativen Geometrieerzeugung eine von drei Säulen zur Bauteilherstellung. Subtraktive Fertigungsverfahren erzeugen die Fertigteilgeometrie mittels Abtragung definierter Bereiche, z. B. durch Bohren oder Fräsen. Formative Fertigungsverfahren definieren die Fertigteilgestalt mittels Umformen eines Halbzeugs, z. B. mittels Tiefziehen oder Gesenkschmieden.

Im Verlauf dieses Jahrzehnts prägte sich der Begriff der additiven Fertigung (engl. additive manufacturing) als Bezeichnung für die zuvor auch als generative Fertigung oder Rapid Prototyping bezeichnete Technologie ein. Aktuell wird nach VDI ein additives Fertigungsverfahren als „Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird“ definiert. Die additive Fertigung (AF) wird dem entsprechend als „Anwendung additiver Fertigungsverfahren“ beschrieben [VDI3405].

Neben der Bezeichnung additive Fertigung wird diese Technologie vermehrt als 3D-Drucken (engl. 3D printing) benannt. Ursprünglich beschrieb dieser Begriff nur die 1995 von der Firma Z Corporation vertriebene Technologie. Hier wird das Bauteil durch ein Inkjet-Verfahren mittels Drucken eines Binders in ein Pulverbett erzeugt. Mittlerweile wird jedoch im allgemeinen Sprachgebrauch jedes bekannte additive Fertigungsverfahren als 3D-Druckverfahren beschrieben – die Maschinen zur AF analog als 3D-Drucker. Dies schließt insbesondere solche Modelle mit ein, die zwar für den Hausgebrauch, nicht aber für die professionelle Anwendung geeignet sind. Aus diesem Grund muss insbesondere zwischen den Verfahren differenziert werden, die für den professionellen Einsatz oder im Konsumentenbereich genutzt werden. Als Beispiel für diese Unterscheidung kann der *Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies* aufgeführt werden. Seit 2013 wird hier zwischen den Konsumenten Anwendungen („Consumer 3D Printing“) und den professionellen Anwendungen („Enterprise 3D Printing“) unterschieden [Ga13]. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den professionellen Anwendungen, z. B. Laser-Sintern oder Laser-Strahlschmelzen.

Weitere Begriffe zur Beschreibung dieser Technologie sind, neben dem zuvor genannten Rapid Prototyping (RP) das Direct oder Rapid Manufacturing (RM) sowie Rapid Tooling (RT). Rapid Prototyping wird zur Herstellung von Prototypen eingesetzt. Hierbei werden spezifische Merkmale des Produkts ausreichend gut ausgeprägt, jedoch ist die Funktionalität i. d. R. eingeschränkt. Direct oder Rapid Manufacturing beschreibt hingegen die Herstellung von Endprodukten mittels AF. Eine Variante des Direct Manufacturing ist das Rapid Tooling, wobei es sich hier um die Fertigung von Werkzeugen, Formen oder Formeinsätzen mittels AF handelt [VDI3405].

2.2 Der Prozess der additiven Fertigung

Vereinfacht kann der Prozess der additiven Fertigung für die bekannten Verfahren einheitlich beschrieben werden (vgl. Abb. 2-1). Aus 3D-CAD-Daten wird eine 2,5D-Schichtdatenrepräsentation der Geometrie abgeleitet. Diese Schichtdaten werden dann verfahrensabhängig aufbereitet und an die jeweilige Maschine übergeben. Nachfolgend fertigt diese das Bauteil dann schichtweise. Im Anschluss an die werkzeuglose, additive Fertigung kann eine Nachbearbeitung erforderlich sein.

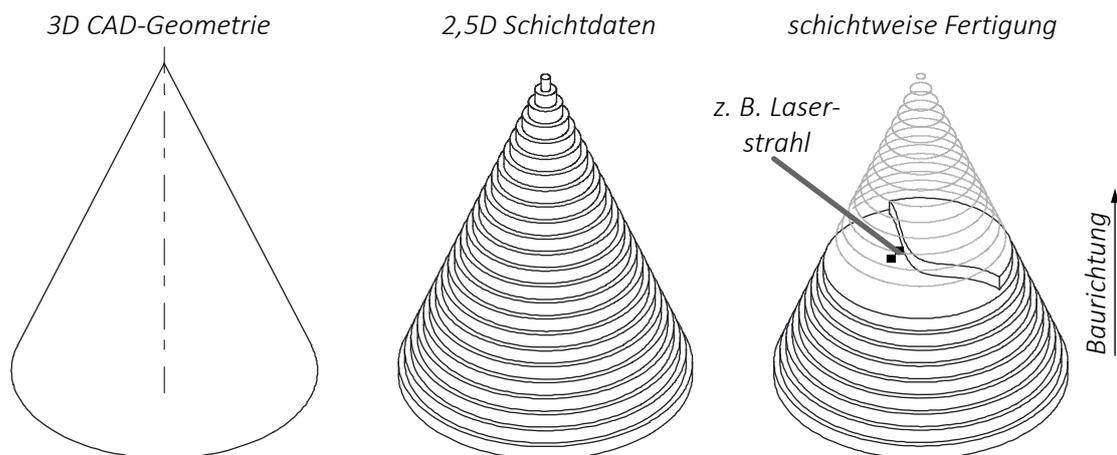


Abb. 2-1: Prozess der additiven Fertigung (vereinfacht)

Nach VDI 3404 wird der Prozessablauf in die drei Schritte Pre-Prozess, In-Prozess und Post-Prozess untergliedert. Diese Gliederung wird folglich genutzt, um die jeweiligen Prozessschritte einzugruppieren.

2.2.1 Pre-Prozess

Der Pre-Prozess beschreibt alle Maßnahmen, die vor der additiven Fertigung erforderlich sind. Hierzu zählen besonders die Datenaufbereitung, das Anbringen von verfahrensabhängig erforderlicher Hilfsgeometrie (Stützkonstruktionen), das Anordnen mehrerer Bauteile im Bauraum bei simultaner Fertigung sowie die Schichtdatengenerierung. Weitere hardwareseitige Prozessvorbereitungsschritte, z. B.

die Anlagenvorbereitung, werden ebenfalls zu den Pre-Prozess Schritten gezählt [VDI3405].

2.2.1.1 Datenaustausch und Datenaufbereitung

Ausgehend von den 3D-CAD-Daten des Bauteils wird üblicherweise ein neutrales Datenformat zum Datenaustausch eingesetzt. Als Industriestandard hat sich an dieser Stelle das STL-Format etabliert [Bi02], [Ge13]. Die Notwendigkeit eines neutralen Datenformats ergibt sich bis dato vor allem aus der Tatsache, dass Pre-Prozess-Operationen, wie das Erzeugen von Stützkonstruktionen und die Bauteilplatzierung, nicht im CAD-Umfeld erfolgen. Genutzt wird üblicherweise spezielle Software, z. B. *Materialise Magics*¹. Da die Schichtdatenerzeugung (vgl. 2.2.1.4) erst nach diesen Schritten erfolgt, ist nach aktuellem Stand der softwareseitigen Prozesskette eine direkte Schichtdatenerzeugung im CAD-System nicht vorgesehen.

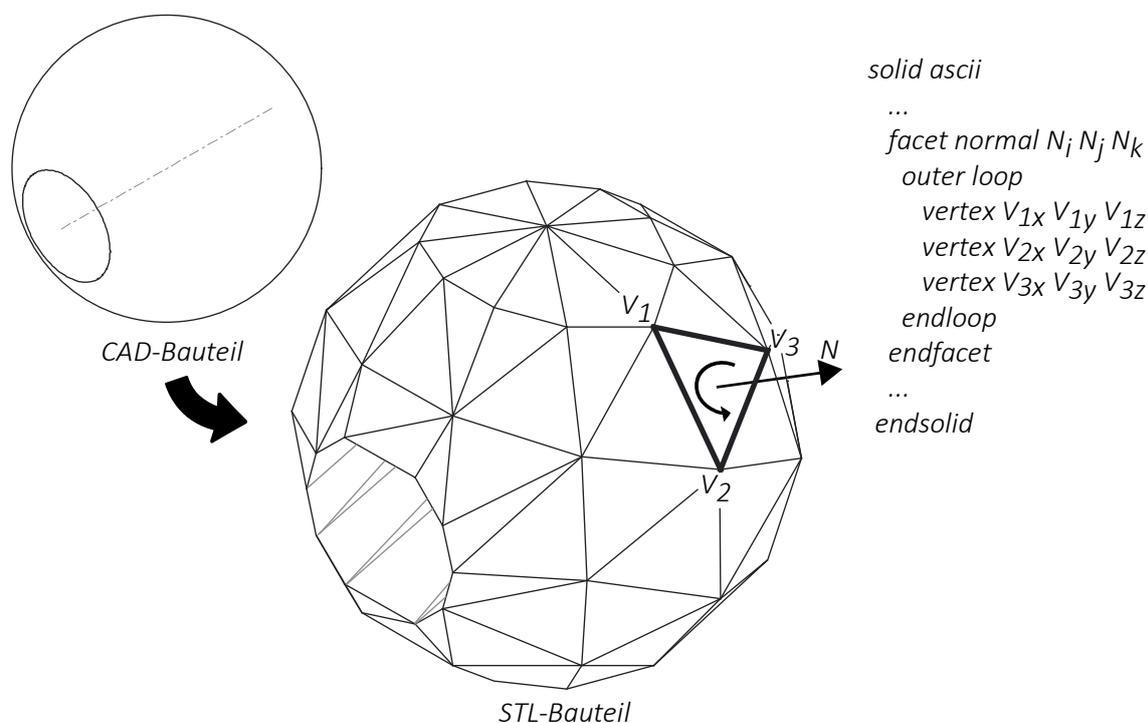


Abb. 2-2: STL-Dateierzeugung aus dem CAD-Bauteil

Das STL-Format (*Surface Tesselation Language*, ursprünglich *Stereolithographie*) beschreibt die Bauteiloberfläche als polyedrische Repräsentation aus Dreiecksflächen. Durch den als Tessellierung beschriebenen Prozess der Netzgenerierung wird die CAD-Bauteiloberfläche in ein approximierendes Netz aus Dreiecksflächen überführt (siehe Abb. 2-2). Die resultierende STL-Datei wird binär- oder ASCII-kodiert gespeichert. Dabei werden die einzelnen Dreiecksflächen als Sätze von X-, Y- und Z-Koordinaten

¹ Materialise Magics ist eine umfassende Softwareumgebung für die AF mit Funktion zur STL-Datenbearbeitung, Schichtdatenerzeugung, Bauteilverschachtelung etc.: <http://software.materialise.com/magics>

der jeweiligen Eckpunkte sowie dem zugehörigen Normalenvektor beschrieben [KaJa97a], [KaJa97b].

Der Vorteil von STL-Daten liegt in der einfachen Beschreibung der Bauteiloberfläche. Die tesselierte Repräsentation kann von nachfolgenden Algorithmen einfach verarbeitet werden. Mathematische Operationen, wie das Schneiden für die Schichtdatenerzeugung, sind ebenfalls verhältnismäßig einfach zu implementieren [MaKu98].

Die Nachteile von STL-Daten rücken mit steigender Leistungsfähigkeit der AF immer weiter in den Fokus. Hier sind vor allem die folgenden Punkte von Bedeutung [Da10], [Bi02]:

- *Genauigkeit:* Durch die Approximation der Oberfläche tritt eine Abweichung zwischen der Originalgeometrie und der tesselierten Beschreibung auf. Dieser Effekt kann durch besonders feine Netzeinstellungen bei der Erzeugung zwar minimiert werden, dies führt jedoch zu größeren Dateien und die Fehlerwahrscheinlichkeit steigt durch die zusätzlichen, kleineren Facetten.
- *Dateigröße:* Zunehmende Genauigkeit führt zu größeren Dateien. Dieser Effekt wird besonders durch den Umstand der redundanten Datenspeicherung verstärkt. Jeder Eckpunkt wird für jede Facette einzeln erfasst und gespeichert (vgl. Abb. 2-2). Dies führt dazu, dass Eckpunkte mindestens dreimal gespeichert werden. Der zusätzlich gespeicherte Normalenvektor ist ebenfalls redundant. Mittels Rechte-Hand-Regel sind die einzelnen Facetten auch ohne Normalenvektor vollständig definiert.
- *Fehlende Topologie:* Bianconi beschreibt STL-Dateien als „Eimer voller Flächen“ [Bi02]. Dieses einfache Bild ist eine zutreffende Beschreibung der fehlenden Topologie. Einzelne Facetten stehen untereinander nicht im Zusammenhang. Dies erschwert nachgelagerte Prozesse bei der Datenverarbeitung und provoziert Fehler.
- *Fehlende Standardisierung:* Durch das Fehlen einer genormten Beschreibung des STL-Formats liegt keine einheitliche Form der Datenspeicherung vor. Die unterschiedlichen CAD-Systeme gehen bei der Netzerzeugung verschieden vor und liefern Ergebnisse unterschiedlicher Qualität. Dies erschwert eine einheitliche Weiterverarbeitung und stellt den Nutzer systemabhängig vor Schwierigkeiten bei der STL-Erzeugung [KöWi14].
- *Erweiterbarkeit und Metadaten:* STL-Dateien bieten nur sehr beschränkt Möglichkeiten zur Übergabe weiterer Informationen. Je Facette können noch zwei Bytes an zusätzlichen Informationen übergeben werden. Mit den so verfügbaren acht Bit können lediglich 256 Zustände abgebildet werden, dies kann z. B. zum Einfärben der Facetten genutzt werden. Für Verfahren, die in der Lage sind, mehrere Materialien zu verarbeiten, ist hier schnell die Kapazitätsgrenze erreicht [DaKö08].

Aufgrund der o. g. Schwachstellen von STL-Dateien sind diese im Rahmen einer Datenaufbereitung zunächst zu prüfen. Erst nach erfolgter Prüfung können die weiteren Pre-Prozess-Schritte erfolgen. Häufig treten fehlende oder falsch orientierte Dreiecke und Lücken auf [DaKö08]. Diese konvertierungsbedingten Fehler sind dann erst zu beheben. Dazu stehen wiederum Softwarelösungen zur Verfügung, die auf die Reparatur fehlender STL-Daten spezialisiert sind. Grundsätzlich können Fehler durch eine optimierte Datenvorbereitung auf der CAD-Seite reduziert werden:

- *CAD-Modellierungsmethodik*: Durch Einhalten der Grundlagen zur sauberen CAD-Modellierung (z. B. nach [VDI2209]) kann eine stabile, regenerierbare Geometrie sichergestellt werden. Bei unsauber modellierten CAD-Bauteilen potenzieren sich bestehende Fehler bei der Tessellierung. Ziel ist es, regenerierbare Volumenkörper zu erzeugen.
- *CAD-Bauteilgenauigkeit*: Die eingestellte Genauigkeit im CAD-System beeinflusst maßgeblich auch die Tessellierung. So treten Lücken in den STL-Daten wegen zuvor unpassend gewählten Genauigkeiten auf. Als Faustregel kann festgelegt werden, dass die CAD-Bauteilgenauigkeit absolut eine Zehnerpotenz genauer als das gewählte Fertigungsverfahren gewählt werden sollte. Für AF bedeutet dies üblicherweise den hundertstel oder tausendstel Millimeterbereich.
- *STL-Exporteinstellungen*: Durch geschickte Wahl der Exportparameter kann die Anzahl der auftretenden Fehler reduziert werden. Generell sollten die Bauteile nur so fein wie nötig vernetzt werden, die Kantenlängen der resultierenden Dreiecke sollten hier über der gewählten Genauigkeit der CAD-Geometrie liegen. CAD-systemabhängig stehen unterschiedliche Einstellmöglichkeiten zur Verfügung. Systemübergreifend kann i. d. R. die Sehnenhöhe (engl. chordal deviation) als steuernder Parameter genutzt werden (Abb. 2-3).

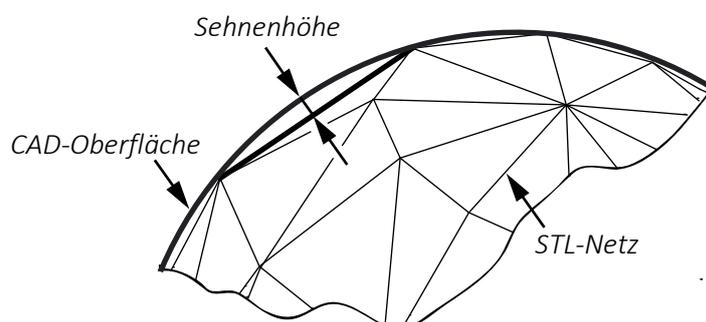


Abb. 2-3: Sehnenhöhe bei der STL-Erzeugung aus dem CAD-System

Basierend auf den Entwicklungen der additiven Fertigungstechnologie und den zuvor genannten Einschränkungen durch das STL-Format, bestanden Bestrebungen, ein neues Datenformat zu entwickeln. Zunächst auch als STL 2.0 bezeichnet, wurde dazu

das Additive Manufacturing File Format AMF standardisiert [HiLi09]. In der aktuellen Form ist dieses als AMF 1.1 von der ASTM und ISO genormt [ISO52915].

Verglichen mit dem STL-Format bietet AMF eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten. Durch den XML²-basierten Aufbau werden die Daten strukturiert ASCII- oder binärkodiert gespeichert. Ein technologieunabhängiges, einfaches, skalierbares und zukunftscompatibles Datenformat zu entwickeln, waren die wesentlichen Anforderungen bei der Entwicklung [HiLi09], [JaKa99]. Die aktuelle Version AMF 1.1 beinhaltet so umfassende Funktionen, dass Diskussionen bestehen, es nicht mehr als reines Datenformat, sondern auch als Programmiersprache Additive Manufacturing Language (AML) zu bezeichnen [Li13].

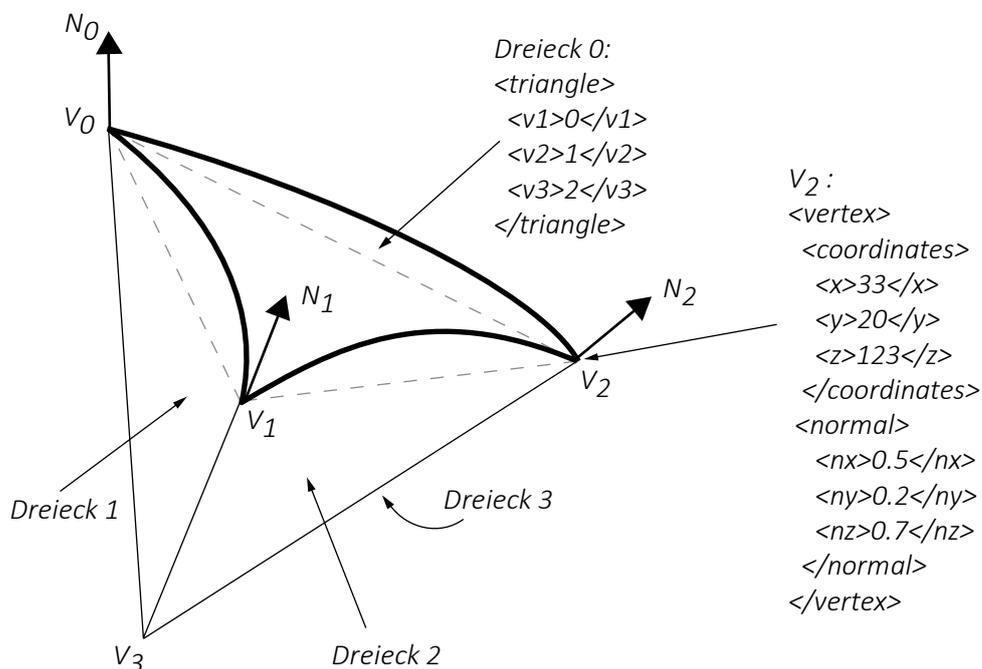


Abb. 2-4: Tetraeder und Dreieck mit Vertex-Normalen im AMF-Format

Die Grundidee von AMF bleibt dieselbe wie bei STL: die CAD-Daten werden in ein Dreiecknetz überführt und dann in dieser Form weiterverarbeitet. Diese Eigenschaft sichert die Kompatibilität mit bestehenden Softwarelösungen und Algorithmen. Darüber hinaus verfügt das Format über weitere Möglichkeiten zur genaueren Wiedergabe der Bauteilgeometrie durch die Integration von gekrümmten Dreiecken. Ebenso sind detaillierte Metadaten (z. B. das verwendete Einheitensystem) ein Bestandteil. Bezüglich aktueller Entwicklungen in der Maschinenteknik können Multimaterialbauteile und Bauteile mit gradierten Materialeigenschaften abgebildet werden. Ebenso wird die Bauteilanordnung im Bauraum der Anlage berücksichtigt. In Abb. 2-4 ist exemplarisch ein Tetraeder dargestellt, für den eine der Dreieckflächen in gekrümmter Form über

² Extensible Markup Language (XML), Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdateien. World Wide Web Consortium (W3C). WWW: <http://www.w3.org/>

Vertex-Normale realisiert wurde. Erkennbar ist die reduzierte Redundanz im Vergleich zu STL. Der Tetraeder wird nur aus den vier Eckpunkten v_0-v_3 und der Verknüpfung dieser zu vier Dreiecken beschrieben.

Als weitere neutrale Datenformate, die für den Geometriedatenaustausch geeignet sind, können IGES, JT und STEP als Beispiele genannt werden. Üblicherweise werden diese derzeit zwar zum Austausch zwischen CAD-Anwendungen, nicht aber zwischen CAD-Anwendung und AF-Software eingesetzt.

Das Initial Graphics Exchange Specification (IGES) Format ist ein weit verbreitetes neutrales Datenformat. Sowohl Constructive Solid Geometry (CSG) als auch Boundary Representation (B-Rep) Algorithmen und Methoden werden unterstützt. Das Format kann Punkte, Linien, Bögen, Kurven, gekrümmte Oberflächen und primitive Volumenkörper abbilden. Jedoch sind die Dateien immer noch mit vielen Redundanzen behaftet und die Algorithmen, welche die IGES-Daten verarbeiten, sind im Vergleich zu STL wesentlich komplexer gestaltet [KaJa97a], [KaJa97b].

Das von *Siemens PLM* vertriebene und genormte Dateiformat Jupiter Tessellation (JT) [ISO14306] dient zur Visualisierung von Produktdaten und gleichzeitig zum Austausch von CAD-Geometrie. B-Rep Geometrie und tesselierte Geometrie werden basierend auf einem Szenengraph unterstützt. Zusätzlich können Informationen zur Produktstruktur, Fertigungsinformationen, Texturen und Metadaten implementiert werden [Si13].

Ein weiteres verbreitetes neutrales Datenformat ist STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data). STEP ist international genormt und kann neben den eigentlichen Geometriedaten auch topologische Daten sowie Metadaten enthalten [ISO10303]. Auch die Dateigröße und die benötigten Computerressourcen gelten als effizient. Allerdings sind in diesem Format viele Redundanzen und Informationen enthalten, die für AF zunächst nicht benötigt werden [Ge13], [KaJa97a], [KaJa97b].

2.2.1.2 Stützkonstruktionen

Stützkonstruktionen (engl. supports) sind neben der Schichtzerlegung eine der Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren. Im Regelfall benötigen alle Verfahren Stützkonstruktionen. Ausgenommen sind die Verfahren, bei denen das Pulverbett während des Bauprozesses auch die Funktion von Stützkonstruktionen übernimmt, z. B. Laser-Sintern. Stützkonstruktionen werden aus folgenden Gründen eingesetzt [VeMa04]:

- *Separieren von Bauteil und Bauplatte:* Um während des Post-Prozesses das Trennen des Bauteils von der Bauplatte sicherzustellen, bietet sich ein Versatz zwischen diesen beiden an, der durch Stützkonstruktionen gefüllt wird. Dies erleichtert üblicherweise die Abtrennung des Bauteils.
- *Fixieren von Bauteilbereichen:* Durch den schichtweisen Aufbau kommt es zu „unstabilen“ Zuständen während des Bauprozesses. So werden einzelne Bereiche von Bauteilen erst zu späteren Zeitpunkten miteinander verschmolzen (sog. Inseln). Um ein sauberes Zusammentreffen der Bauteilbereiche zum Zeitpunkt der Verschmelzung sicherzustellen, müssen die einzelnen Bereiche zuvor mit Stützkonstruktionen fixiert werden. So können auch thermisch induzierter Verzug (engl. curling) und Deformationen reduziert werden.
- *Stützen von hängenden Strukturen:* (Über)hängende Strukturen, z. B. Auskragungen, besitzen i. d. R. nicht genügend Festigkeit, um während des Bauprozesses selbsttragend zu sein. Diese Bereiche müssen dann von Stützkonstruktionen „getragen“ werden, um nicht abzusacken.
- *Optimierung des Bauprozesses:* Stützkonstruktionen erfüllen prozessspezifisch auch die Funktion der Wärmeabfuhr (Laser-Strahlschmelzen). Darüber hinaus dienen diese auch zur Optimierung des Ausgangsmaterialflusses um das Bauteil herum während des Bauprozesses. Dies trifft bei flüssigen Ausgangsmaterialien zu, die z. B. bei der Stereolithografie verwendet werden [VeMa04].

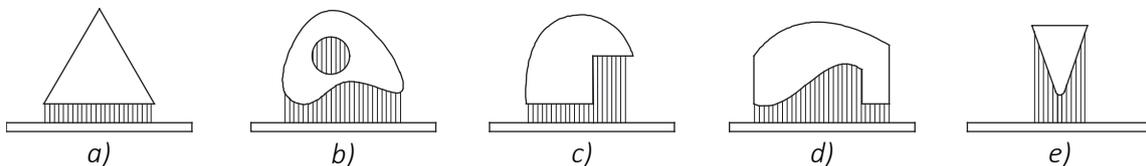


Abb. 2-5: Klassifizierung von Stützkonstruktionen

Stützkonstruktionen können nach Abb. 2-5 klassifiziert werden. Fall a) zeigt die Funktion des Separierens von der Bauplatte. Fall b) zeigt in der Bohrung interne und unter dem Bauteil externe Stützkonstruktionen. In c) ist ein Überhang dargestellt, in d) eine Insel. Fall e) zeigt die stabilisierende Wirkung der Hilfsgeometrie während des Bauprozesses. Ausgeführt werden die Stützkonstruktionen in unterschiedlichsten Ausprägungen. Üblicherweise werden die Stützkonstruktionen, basierend auf den STL-Daten des Bauteils, mit spezifischer Software im Rahmen der Prozessvorbereitung erzeugt. Gängige Ausprägungen sind z. B. Gitter- oder Wabenstrukturen.

Geht man von den STL-Daten des Bauteils aus, kann vereinfacht angenommen werden, dass jede nach unten weisende Facette Stützkonstruktionen benötigt. Dies bedeutet, dass der Normalenvektor, dieser als Downskin-Fläche bezeichneten Facette in Bezug auf die Baurichtung Z ein negatives Vorzeichen aufweist. Zusätzlich kann

i. d. R. ein Downskin-Winkel δ von 42-45° in Bezug auf die Schichtebene als Randbedingung definiert werden (vgl. Abb. 2-6).

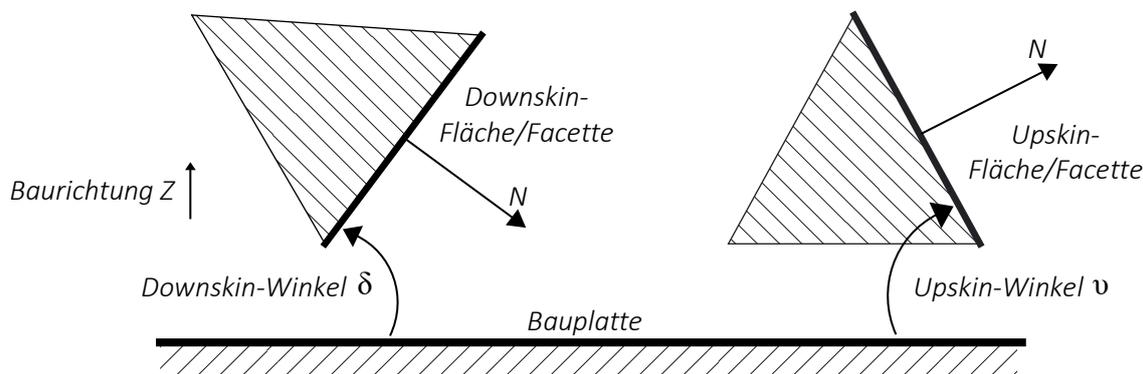


Abb. 2-6: Up- und Downskin-Flächen nach [VDI3405-3]

Ist der Downskin-Winkel größer, wird die jeweilige Facette als selbststützend definiert und benötigt keine Stützkonstruktionen. Dasselbe gilt für Facetten, die eine Mindestgröße unterschreiten. So müssen sehr kleine Überhänge u. ä. nicht gestützt werden. Nach [VeMa04] kann das Gesamtvolumen V_{sup} der erforderlichen Stützkonstruktionen eines Bauteils wie folgt berechnet werden:

$$V_{sup} = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n A_i \cdot h_i \quad (2.1)$$

Dabei ist V_i das erforderliche Volumen an Stützkonstruktionen. Für eine Facette i setzt sich V_i aus der auf die Schichtebene projizierten Querschnittsfläche A_i der Facette und der mittleren Höhe h_i zusammen. Die mittlere Höhe wird zwischen der Downskin-Fläche i und entweder der jeweils darunter liegenden, nach oben gerichteten Upskin-Fläche oder der Bauplatzform gebildet.

Die Ermittlung des Volumens der anfallenden Stützkonstruktionen ist vor allem in Bezug auf die Wahl der Bauteilorientierung von Bedeutung. Je nach Orientierung des Bauteils fallen die Stützkonstruktionen verschieden aus. Grundsätzlich ist es das Ziel, Downskin-Flächen zu minimieren oder den Downskin-Winkel zu optimieren und somit Stützkonstruktionen zu reduzieren [Da10].

2.2.1.3 Simultane Fertigung und Bauteilanordnung

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die simultane Fertigung mehrerer Bauteile in einem Bauprozess. Prinzipiell lassen sich die Bauteile dabei neben- und ineinander verschachteln (engl. nesting) oder zusätzlich auch übereinander packen (engl. packing). Das Resultat wird als Bauteilanordnung bezeichnet. Die Bauteilanordnung ist die Kombination der Vorgänge zur Bauteilorientierung (vgl. Abschnitt 2.2.1.2) und

Bauteilpositionierung. Die Bauteilpositionierung ist der Vorgang, durch den die Position des Bauteils auf der Bauplatte durch Translation des orientierten Bauteils entlang der Maschinenachsen festgelegt wird [VDI3405-3].

Wesentlicher Vorteil der simultanen Fertigung ist die erzielbare Kosteneinsparung. Durch die simultane Fertigung mehrerer Bauteile fallen je Los weniger Rüst- und Nachbearbeitungszeiten an. Größere Einsparungen können dann erzielt werden, wenn aufeinanderfolgende Bauprozesse optimiert geplant werden. Da für den jeweiligen Bauprozess vor allem die Anzahl der resultierenden Schichten die Fertigungszeit bestimmt, können so Zeiten eingespart und damit die Anlagennutzung erhöht werden.

Beispiel: alle Bauteile mit je 50 mm Durchmesser. 6 x 150 mm, 12x 100 mm und 30 x 50 mm Höhe. Schichtdicke 20 µm. Belichtungszeit je Schicht für eine Kontur und Fläche pro Bauteil: ca. 0,561 s. Auf Grund der Anzahl der Bauteile sind drei aufeinanderfolgende Bauprozesse erforderlich.

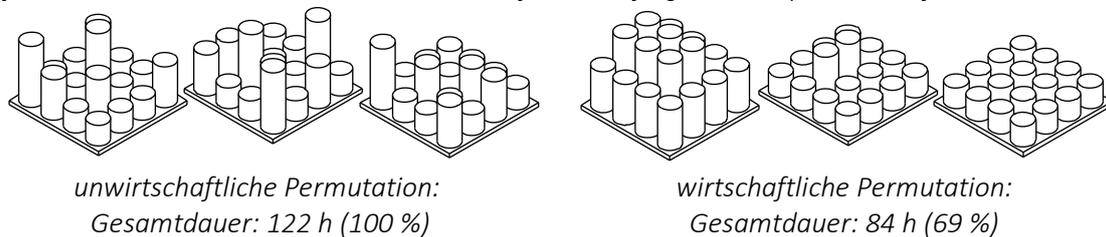


Abb. 2-7: Wirtschaftliche Bauteilreihenfolge durch Zeitersparnis nach [MaKö11]

Das Beispiel in Abb. 2-7 zeigt das Potenzial einer optimierten Permutation für das Verfahren Laser-Strahlschmelzen. Für die Ermittlung der In-Prozess-Zeit t_p werden vereinfacht nur die Belichtungszeit $t_{s,i}$ und die Materialauftragszeit t_m je Schicht i berücksichtigt:

$$t_p = \sum_{i=1}^n (t_{s,i} + t_m) \quad (2.2)$$

Die Materialauftragszeit wird dabei als konstant angenommen. Die Belichtungszeit in der Schicht setzt sich aus den Zeiten für die Kontur- t_o und Flächenbelichtung t_a zusammen. Die Konturbelichtungszeit ergibt sich vereinfacht aus der Summe der Länge l aller Konturen k der jeweiligen Schicht und der Scangeschwindigkeit v_s des Lasers. Die Flächenbelichtungszeit kann aus den j zu belichtenden Flächen A_c sowie dem Fokussdurchmesser³ d_f des Lasers und der Scangeschwindigkeit bestimmt werden.

³ Alternativ zum Fokussdurchmesser kann hier der Spurbabstand genutzt werden. Abhängig von Anlage und verwendeter Software ist der Spurbabstand einfacher zu definieren als der Fokussdurchmesser des Lasers.

Diese Vereinfachung ergibt sich aus der Vergleichsrechnung mit äquivalenten Quadratflächen [MaKö11]:

$$t_{s,i} = t_{o,i} + t_{a,i} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{l_k}{v_s} \right) + \sum_{j=1}^n \left(\frac{A_c}{d_f \cdot v_s} \right) \quad (2.3)$$

Zu berücksichtigen sind die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen. Insbesondere die gegenseitige Beeinträchtigung durch die eingebrachte Wärme kann signifikante Qualitätsauswirkungen haben. Darüber hinaus muss die Entformbarkeit bzw. das Auspacken der Bauteile sichergestellt werden. Bei den AF, die Stützkonstruktionen benötigen, muss dies als weitere Einschränkung beachtet werden. Stützkonstruktionen zwischen zwei Bauteilen sollten dabei stets vermieden werden. Prozessabhängig ist es üblich, einen Mindestabstand zwischen den gefertigten Bauteilen zu beschreiben. Darüber hinaus ergeben sich für die Verschachtelung bzw. das Packen verfahrensabhängig unterschiedliche Optionen. Diese können nach [KöWi14] wie in Abb. 2-8 gezeigt klassifiziert werden.

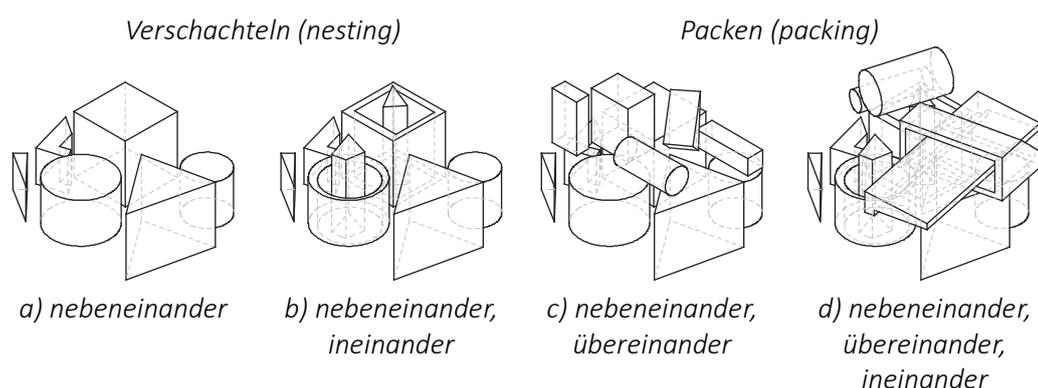


Abb. 2-8: Klassifizierung der Verschachtelungs- und Packungstypen

Üblicherweise kommen die nach Abb. 2-8 klassifizierten Typen b) und d) zum Einsatz. Typ b) kann z. B. den Verfahren Laser-Strahlschmelzen, Poly-Jet Modeling oder Stereolithografie zugeordnet werden. Diese zeichnen sich durch die Notwendigkeit von Stützkonstruktionen aus. Typ d) kommt hingegen bei den Verfahren zum Einsatz, die keine Hilfsgeometrie benötigen. Diese sind z. B. Laser-Sintern und 3D-Drucken⁴.

Auch wenn bereits Software zur Prozessvorbereitung verfügbar ist, die den Prozess der Bauteilanordnung unterstützt, bleibt dieser Schritt eine komplexe Aufgabe. Expertenwissen des jeweiligen Prozesseinrichters ist zwingend erforderlich. Gute Softwarelösungen zur Unterstützung sind vor allem für reproduzierbare Problemstellungen verfügbar. Ein Anwendungsfall ist z. B. das Verschachteln von Zahnersatz-Rohlingen beim Laser-Strahlschmelzen.

⁴ 3D-Drucken, Verfahren nach [VDI3405]

2.2.1.4 Schichtdatengenerierung

Der wesentliche Schritt zur Prozessvorbereitung bei allen additiven Verfahren ist die Schichtdatengenerierung. Die Schichtdatengenerierung beschreibt den Vorgang, bei dem die 3D-Geometrie mittels ebener Schnitte parallel zur Bauplatte in Konturen und Flächenbereiche für jede Schicht überführt wird. Geht man von dem einfachen Fall aus, dass die Schichtdicke s über die gesamte Bauhöhe Z_{max} konstant ist, spricht man von uniformer Schichtzerlegung. Damit können die n Schichtebenen z_i wie folgt als parallele Ebenen zur XY-Ebene definiert werden [VeMa04]:

$$z_i = z_{i-1} + s \text{ für } i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.4)$$

Um anschließend die einzelnen Schnittkonturen zu berechnen, kann, triangulierte Daten vorausgesetzt, die Durchdringung zwischen den Kanten der einzelnen Dreiecke und der Schichtebene z_i bestimmt werden. Sinnvollerweise werden die ungeordneten STL-Daten dazu zunächst sortiert, z. B. entsprechend ihrer Z-Koordinate. So muss die Durchdringungsprüfung nicht für jede Kante des Bauteils erfolgen, sondern nur für die Kanten, für die eine Lösung plausibel ist. Beschreibt man die Endpunkte der jeweiligen Kante in vektorieller Form als:

$$p_1 = x_1i + y_1j + z_1k \text{ und } p_2 = x_2i + y_2j + z_2k \quad (2.5)$$

ergibt sich nach [VeMa04] der Durchdringungspunkt p wie folgt (vgl. Abb. 2-9):

$$p = \left[x_1 + \frac{(z_i - z_1) \cdot (x_2 - x_1)}{(z_2 - z_1)}, y_1 + \frac{(z_i - z_1) \cdot (y_2 - y_1)}{(z_2 - z_1)}, z_i \right]^T. \quad (2.6)$$

Als Problem können bei der Lösung sog. non-manifold Punkte und Kanten auftreten, d. h. ein Eckpunkt oder eine Kante liegen innerhalb der Schnittebene. Diese Fälle sind durch geeignete Algorithmen abzufangen (siehe z. B. [JaHa95], [TaFa98]).

Im Anschluss müssen die Schichtdaten „bereinigt“ werden. Nach der Ermittlung aller Durchdringungspunkte und der Klassifizierung, entsprechend der ursprünglich zugehörigen Dreieckflächen, stehen zunächst nur die Punkte in der Schicht zur Verfügung. Für die weitere Verwendung müssen die Punkte zunächst in Konturen überführt und ggf. bereinigt werden, d. h. überflüssige Punkte werden entfernt. Im Anschluss müssen alle Konturen einer Schicht klassifiziert werden. Durch die Klassifizierung als interne und externe Kontur können die dazwischen liegenden Füllbereiche identifiziert werden (Abb. 2-9) [Sc02], [VeMa04].

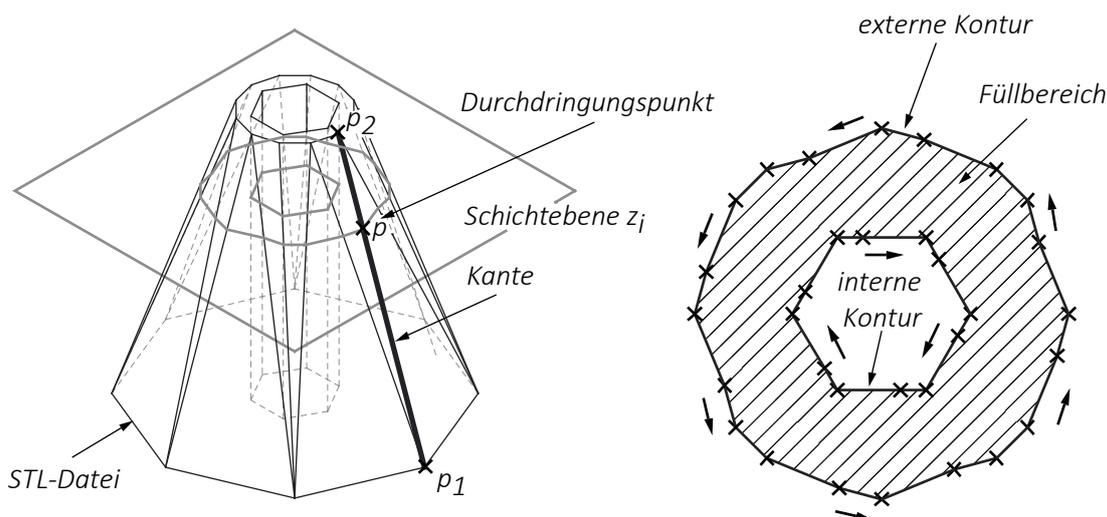


Abb. 2-9: Erzeugen von Schichtdaten basierend auf STL

Neben der hier genannten Vorgehensweise der uniformen Schichtzerlegung besteht auch die erweiterte Methode der adaptiven Schichtzerlegung mit variablen Schichtdicken. Werden direkt CAD-Daten und keine zuvor tesselierten STL- oder AMF-Daten geschnitten, wird diese Methodik als direkte Schichtzerlegung bezeichnet.

Die Methode der adaptiven Schichtzerlegung geht davon aus, dass durch angepasste Schichtdicken die Schichtzahl reduziert wird, ohne die Qualität negativ zu beeinflussen. So kann in Bereichen mit höheren Qualitätsanforderungen eine geringere Schichtdicke gewählt werden, als in Bereichen mit niedrigeren Anforderungen. Eine Variante der adaptiven Schichtzerlegung ist die Hülle-Kern-Strategie. Hier werden die internen und externen Konturen in jeder Schicht hergestellt, der Füllbereich aber beispielsweise nur in jeder vierten Schicht. So kann an der Oberfläche eine hohe Qualität erreicht werden. Üblicherweise wird der Parameter der Spitzenhöhe (eng. cusp height) als Maß für die Optimierung der Schichtdicke genutzt [DoMä94]. Die Spitzenhöhe beschreibt hier die Abweichung von der zu schneidenden Geometrie als Höhe eines Fehlerdreiecks, das aus dem Treppenstufeneffekt bei der Schichtzerlegung resultiert (vgl. Abb. 2-10) [Da10], [Sc02].

Die direkte Schichtzerlegung setzt voraus, dass alle zuvor erfolgten Pre-Prozess-Operationen, z. B. die Stützkonstruktionserzeugung, an der nativen CAD-Geometrie durchgeführt werden können. Prinzipiell bringt die direkte Schichtzerlegung Vorteile, vor allem da der Schritt der Tessellierung entfällt. Nachteilig ist jedoch, dass die auf STL basierten Lösungen nicht in der bisherigen Form genutzt werden können, wodurch eine Akzeptanz dieser Vorgehensweise im industriellen Alltag noch nicht zu erkennen ist [SeMa14].

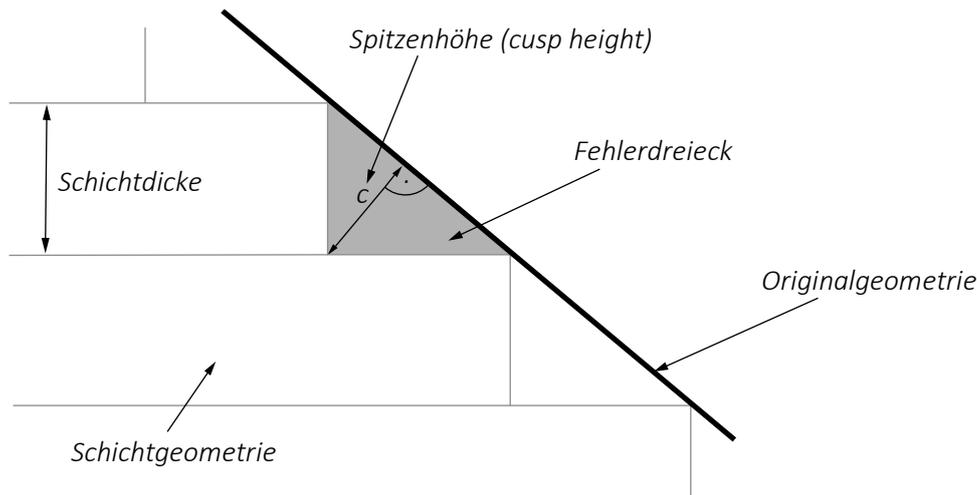


Abb. 2-10: Spitzenhöhe (cusp height) und Treppenstufeneffekt

Als Datenaustauschformat stehen sogenannte 2,5D-Formate zur Verfügung. Ein gängiges systemübergreifendes und anlagenneutrales Format ist das CLI-Datenformat (Common Layer Interface). Textbasiert werden hier die Informationen zu den einzelnen Konturen einer Schicht erfasst. Entsprechend der in Abb. 2-9 skizzierten Klassifikation werden auch hier interne und externe Konturen unterschieden, um den Füllbereich zu identifizieren. Gespeichert werden können sowohl Polylinien als auch Polygone, wobei nur letztere als interne oder externe Kontur identifiziert werden. Mithilfe der Polylinien können dünnwandige Strukturen, wie Filterelemente oder Stützkonstruktionen, beschrieben werden. Weitere Formate auf Basis der bekannten Druckersoftware, z. B. HPGL (Hewlett Packard Graphic Language) werden ebenfalls verwendet [Ge13], [SeMa14].

Basierend auf den Schichtdaten werden dann die Belichtungspfade berechnet (engl. path planning). Für die Konturbelichtung können direkt die Polygone und Polylinien genutzt werden. Um die Füllbelichtung (engl. hatch) zu realisieren, werden spezifische Pfade erzeugt, die verfahrensabhängig verschieden sind. Die Berechnung der Belichtungspfade erfolgt i. d. R. mit verfahrens- und anlagenabhängiger Software.

Hier werden dann auch die prozessspezifischen Parameter eingestellt. Dies sind z. B. die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit und der Spurabstand. Auch Heiz- und Kühl- bzw. Verweilzeiten müssen definiert werden. Diese Parameter sind je nach genutztem Verfahren verschieden und müssen immer Werkstoff- und Anwendungsfallgerecht definiert werden. Oft sind Erprobungen notwendig, um geeignete Parametersätze zu definieren und die gewünschten Materialeigenschaften zu generieren. Verschiedene Richtlinien (z. B. [VDI3405-2], [VDI3405-1]) definieren hier Möglichkeiten zur Optimierung und Güteüberwachung.

2.2.2 In-Prozess

Als In-Prozess werden die letztlich in der Maschine erfolgenden Fertigungsoperationen beschrieben. Dies ist vor allem der schichtweise Aufbau der Bauteile. Des Weiteren werden alle weiteren in der Maschine erfolgenden Maßnahmen, einschließlich der Entnahme der Bauteile, als In-Prozess klassifiziert [VDI3405].

Als exemplarisches Beispiel für AF wird das Laser-Strahlschmelzen zur Erläuterung der In-Prozess-Schritte vorgestellt. Laser-Strahlschmelzen (i. d. R. werden Metalllegierungen verarbeitet) ist ein mit dem Laser-Sintern (i. d. R. werden Polymere verarbeitet) eng verwandter Prozess, bei dem das Ausgangsmaterial vollständig aufgeschmolzen wird.

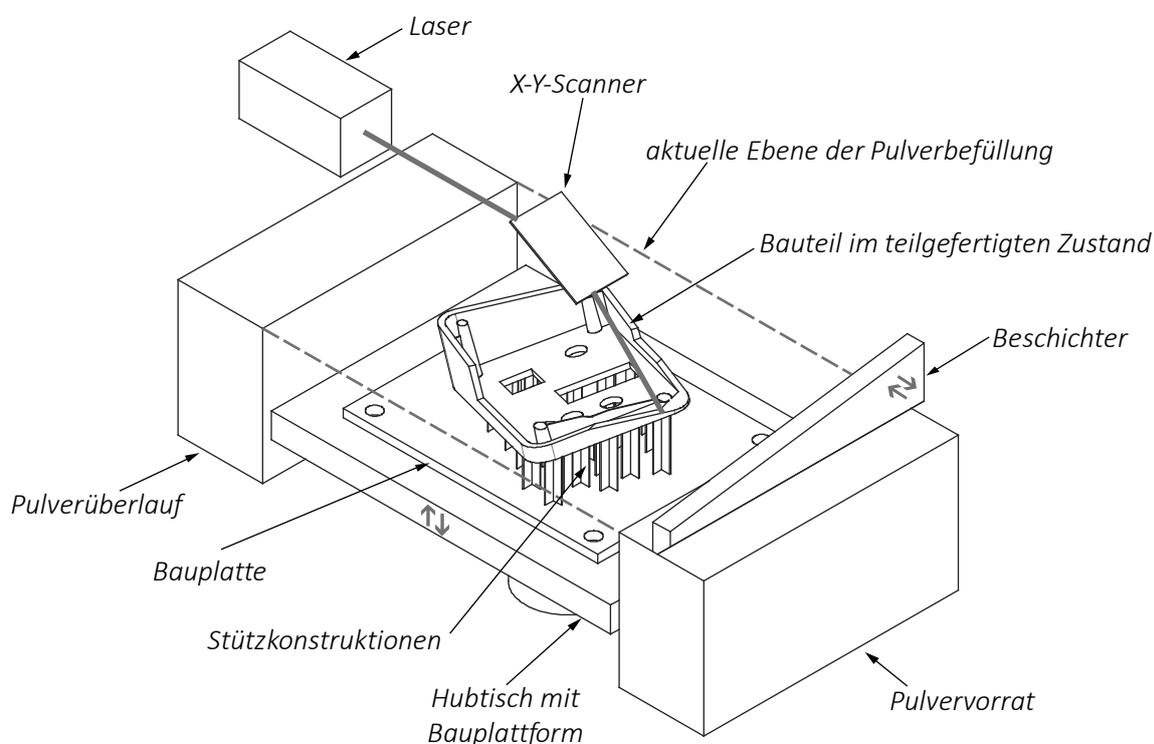


Abb. 2-11: Prinzipdarstellung Laser-Strahlschmelzen

In Abb. 2-11 ist das Verfahren dargestellt. Die Momentaufnahme zeigt den Zustand in einer beliebigen Schicht während des Bauprozesses. Das Pulver ist in dieser Abb. nicht dargestellt. Der Prozess durchläuft solange schichtweise dieselben Sequenzen, bis das Bauteil fertiggestellt ist. Dabei wird für jede Schicht der Hubtisch mit Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt. Die damit verbundene Bauplatte und letztlich auch das (teil)gefertigte Bauteil werden entsprechend mit abgesenkt. Nach dem Absenken wird mittels Beschichter eine neue Pulverschicht in der gewählten Schichtdicke aufgetragen. Überschüssiges Pulver wird hierbei im Pulverüberlauf aufgefangen. Anschließend werden die erforderlichen Konturen und Flächenbereiche in der aktuellen Schicht be-lichtet. Durch lokales Aufschmelzen mittels Laser und das folgende Verschmelzen

beim Erstarren wird die Geometrie der aktuellen Schicht an die Vorhergegangene angebunden. Der Laserstrahl wird hierbei über einen X-Y-Scanner (Spiegel) gelenkt.

Bei der Herstellung laser-strahlgeschmolzener Bauteile ist üblicherweise Zusatzgeometrie in der Form von Stützkonstruktionen erforderlich. Diese Stützkonstruktionen sichern zum einen die Bauteilstabilität und Lage während des Bauprozesses. Zum anderen dienen die Stützkonstruktionen zur Regulierung des Wärmehaushalts. Durch die Anbindung an die Bauplatte kann die während des Prozesses in das Bauteil eingebrachte Wärme abgeführt werden, um z. B. Eigenspannungen etc. zu verringern (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).

Ist die letzte Schicht erreicht, verbleibt das Bauteil ggf. noch einen definierten Zeitraum in der Anlage. So kann es abkühlen und Spannungen werden reduziert. Danach wird die Bauplatte von der Bauplattform gelöst und zusammen mit dem darauf gefertigten Bauteil inkl. Stützkonstruktionen der Maschine entnommen.

2.2.3 Post-Prozess

Die im Anschluss an die Bauteilentnahme zwingend erforderlichen Schritte werden als Post-Prozess beschrieben. Hierzu zählen die Entfernung von Pulverrückständen und Hilfsgeometrie sowie weitere Schritte zur Herstellung der geforderten Bauteileigenschaften [VDI3405]. Dies kann beispielsweise eine Wärmebehandlung sein.

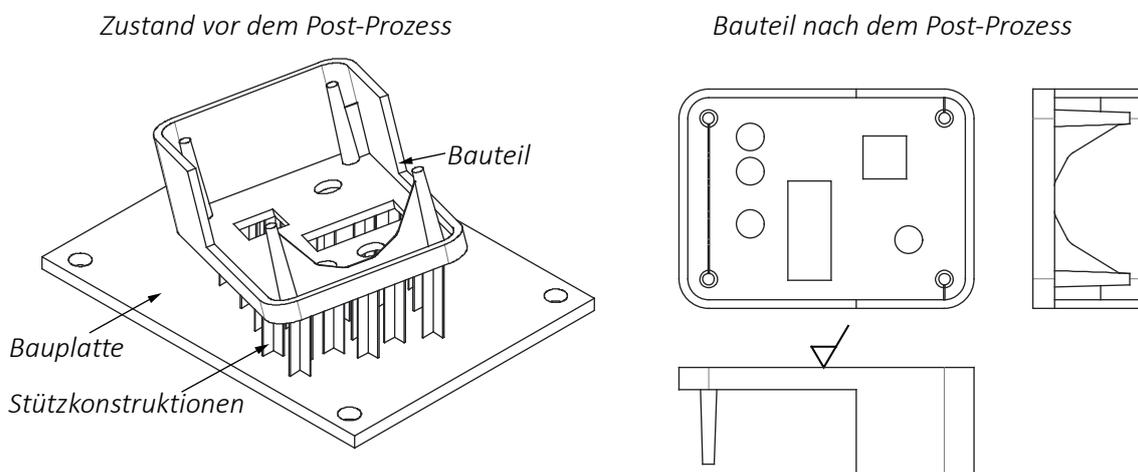


Abb. 2-12: Zustände vor und nach dem Post-Prozess

In Bezug auf das in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Beispiel muss zunächst das gesamte verbliebene Pulver entfernt werden. Dies erfolgt üblicherweise durch Reinigung mit Druckluft. Im Anschluss muss das Bauteil von der Bauplatte getrennt bzw. die Stützkonstruktionen müssen entfernt werden. Dieser Schritt kann z. B. durch Erodieren oder spanende Bearbeitung erfolgen. Das Entfernen der Stützkonstruktionen ist ein aufwendiger Schritt bei der Nachbearbeitung, daher sollten so wenige Stütz-

konstruktionen wie möglich vorgesehen werden. In Abb. 2-12 sind die jeweiligen Zustände vor und nach dem Post-Prozess dargestellt.

2.2.4 Nach- und Weiterbearbeitung

Je nach Einsatzzweck der Bauteile sind im Anschluss an die additive Fertigung weitere Bearbeitungsschritte erforderlich. Hierfür kommen alle konventionellen Fertigungsverfahren (vgl. z. B. [DIN8580]) zum Einsatz. Diese Nachbearbeitungsschritte sind bei der Bauteilgestaltung z. B. durch geeignete Aufmaße zu berücksichtigen.

Eine Nachbearbeitung von Funktionsflächen bei dem zuvor gewählten Beispiel Laser-Strahlschmelzen ist üblicherweise erforderlich, da durch Pulveranhaftungen etc. eine raue Bauteiloberfläche entsteht. Ebenso kommt es zu Maß-, Form- und Lageabweichungen, die durch eine Nachbearbeitung reduziert werden können. Weitere Möglichkeiten zur Nachbearbeitung sind in [VDI3405-2], [VDI3405-3] beschrieben.

Die Begriffe Post-Prozess und Nachbearbeitung werden anwenderspezifisch mitunter auch anders definiert. Die hier dargestellte Unterscheidung entspricht der aktuellen VDI-Richtlinie 3405.

3 Modellbasierte Lösungsmethodik

Als interdisziplinärer Ansatz liefert Systems Engineering eine Methodik zur modellbasierten Entwicklung von komplexen Systemen. Bei der hier vorliegenden Problemstellung, einen Lösungsansatz für die CAD-CAM-Prozesskette der additiven Fertigung zu entwickeln, bieten sich diese Methoden somit für die Entwicklung der Lösung an. In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels erfolgt eine kurze Zusammenfassung der entsprechenden Grundlagen.

Umfassende Informationen zu Systems Engineering und zur modellbasierten Lösungsfindung sind in der Fachliteratur dokumentiert. Zu nennen sind hier z. B. [DaHa02], [Ka07], [Zü04] und die Webseiten des *International Council on Systems Engineering*⁵.

3.1 Systems Engineering

Systems Engineering (auch Systems Design oder Systems Design Engineering) kann als die Gesamtheit der Aktivitäten bezeichnet werden, die erforderlich sind, um ein System zu entwickeln. Dabei gliedert sich Systems Engineering in die drei wesentlichen Bausteine Systemarchitektur, Systemanforderungen und Systemverhalten [Al12].

3.1.1 Systemarchitektur

Die Architektur eines Systems beinhaltet die Komponenten, aus denen das System besteht und die entsprechende Struktur. Darüber hinaus werden die internen Schnittstellen beschrieben, also die Verbindungen einzelner Komponenten. Ebenfalls werden die externen Schnittstellen des Systems und der Komponenten mit anderen Systemen und deren Komponenten strukturiert. Die Architektur beschreibt damit die Art- und Weise, durch die ein Problem mittels eines Systems gelöst wird. Dabei beschreibt die Architektur jedoch nicht die Funktion selbst [Al12].

Ein Beispiel hierfür ist eine Baugruppenzeichnung. Aus dieser geht hervor, welche Komponenten für die Lösung eines Problems wie miteinander verbunden werden. Dennoch kann für dasselbe Problem eine andere Lösung in Form einer anderen Baugruppe existieren, welche dieselbe Gesamtfunktion erfüllt.

3.1.2 Systemanforderungen

Die Anforderungen sind die Grundlagen für die Systementwicklung. In strukturierter Form beschreiben diese die Funktionen, die von dem zu entwickelnden System erfüllt

⁵ WWW: <http://www.incose.org/>

werden müssen. Unterschieden werden können funktionale und nichtfunktionale Anforderungen [Al12].

Funktionale Anforderungen beschreiben die auszuführende Aufgabe eines Systems. Also „was“ das System „wie“ durchführen soll.

Ein Beispiel für eine funktionale Anforderung ist:

„Bei Linksdrehung des Lenkrades muss das Fahrzeug nach links abbiegen“.

Nichtfunktionale Anforderungen sind vor allem Qualitätsanforderungen zur Beschreibung der Produkteigenschaften. Ein Beispiel für eine nichtfunktionale Anforderung ist:

„Das Drehen des Lenkrades soll der Fahrer ohne großen Kraftaufwand durchführen können“.

Das Erfassen und Verwalten von Anforderungen wird als Requirements Engineering bezeichnet. In der Fachliteratur (siehe z. B. [Ho07], [Ru09], [VaHe13]) sind weitere Informationen dazu enthalten.

3.1.3 Systemverhalten

Die Beschreibung des Systemverhaltens ist die formalisierte Erfassung der Anforderungen. Hier werden die zuvor textuell erfassten Anforderungen in maschinenlesbarer Form beschrieben. Dies erleichtert eine automatisierte und rechnergestützte Verarbeitung der Informationen, z. B. durch Codegenerierung [Al12].

In dieser Arbeit wird die *Systems Modeling Language* (SysML) als Beschreibungssprache für das Systemverhalten genutzt. Weitere Lösungen zur Verhaltensbeschreibung sind u. a. die *Specification and Description Language* (SDL), Petri-Netze oder bekannte Werkzeuge zur grafischen Funktionsentwicklung wie Matlab/Simulink.

3.2 SysML

Die *Systems Modeling Language* ist eine grafische Sprache. Mit SysML können technische Systeme jeder Art abgebildet werden. Als offizieller Standard der *Object Management Group* (OMG) ist SysML seit der Version 1.0 aus dem März 2007 verfügbar. In dieser Arbeit wird die Version 1.3 aus dem Jahr 2012 genutzt [OMG12]. Während der Bearbeitung dieser Arbeit ist die Beta-Spezifikation der SysML Version 1.4 im März 2014 veröffentlicht worden. Weitere Informationen zu dem aktuell gültigen Standard und Neuentwicklungen werden auf den OMG Webseiten⁶ veröffentlicht. An dieser Stelle kann nur eine kurze Zusammenfassung des Standards erfolgen, weite-

⁶ WWW: <http://www.omg.sysml.org/>

re Informationen finden sich in der entsprechenden Fachliteratur, z. B. [Al12], [De14], [HoPe08], [We14].

3.2.1 Gemeinsamkeiten von SysML und UML

SysML basiert auf der Softwaremodellierungssprache *Unified Modeling Language* (UML). Als Weiterentwicklung bietet SysML Funktionalitäten für die ganzheitliche Produktentwicklung und beschränkt sich nicht nur auf die Softwareentwicklung. Die Schnittmenge zwischen SysML und UML wird auch als UML for SysML bezeichnet. Als Beschreibungssprache für die objektorientierte Softwareentwicklung basiert UML auf Klassen sowie Objekten und Parts als Instanzen einer Klasse und dem damit verbundenen Konzept der Vererbung [Al12].

In Abb. 3-1 ist dieser Zusammenhang als UML-Diagramm dargestellt. Die Klasse Rillenkugellager erbt von der Klasse Wälzlager die Attribute Außendurchmesser, Innendurchmesser und Breite. Ergänzt wird dies um das Attribut Kugelanzahl. Die beiden auf der rechten Seite dargestellten Objekte bilden jeweils eine Instanz der Klasse Rillenkugellager. Als solche sind diese mit einem eindeutigen Namen benannt und weisen Werte für die jeweiligen Attribute aus.

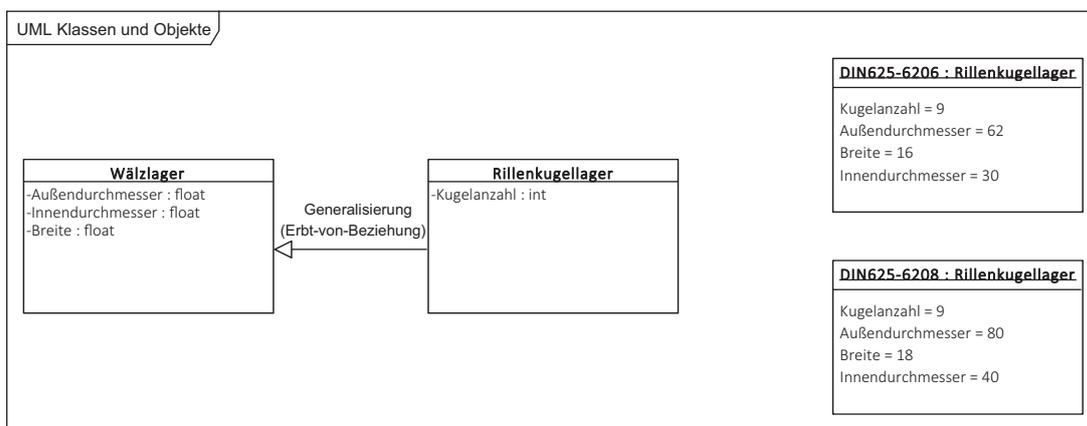


Abb. 3-1: Klassen und Objekte in UML-Darstellung

Diese Objektorientierung ist auch in SysML als Grundidee enthalten. Um eine Abgrenzung zu UML zu schaffen und den Anwendungsbereich zu erweitern, sind die entsprechenden Begriffe aus der objektorientierten Programmierung umbenannt worden. SysML bildet UML-Klassen als Blöcke ab. Die Idee ist hierbei, dass Blöcke jede Art von Systemkomponenten darstellen können. So kann ein Block z. B. nur eine Blackbox repräsentieren, deren Schnittstellen mit den anderen Systemkomponenten bekannt sind. Dieser Ansatz ermöglicht es, auch interdisziplinär an einem Projekt zu arbeiten.

3.2.2 Diagramme in SysML

SysML stellt dem Benutzer neun verschiedene Diagrammtypen zur Verfügung. Als Sicht auf das Modell visualisieren die Diagramme die Inhalte der Modelldatenbank. In den verfügbaren Modellierungswerkzeugen⁷ werden üblicherweise Baumstrukturen, vergleichbar mit CAD-Modellbäumen, für die Anzeige aller Datenbankelemente zur Verfügung gestellt.

SysML-Diagramme werden in drei verschiedene Diagrammtypen gegliedert (vgl. Abb. 3-2). Strukturelle Diagramme bilden die statischen Systemeigenschaften und somit die Systemarchitektur ab. Dem Nutzer stehen dazu Paketdiagramme, Blockdefinitionsdiagramme und Zusicherungsdiagramme zur Verfügung.

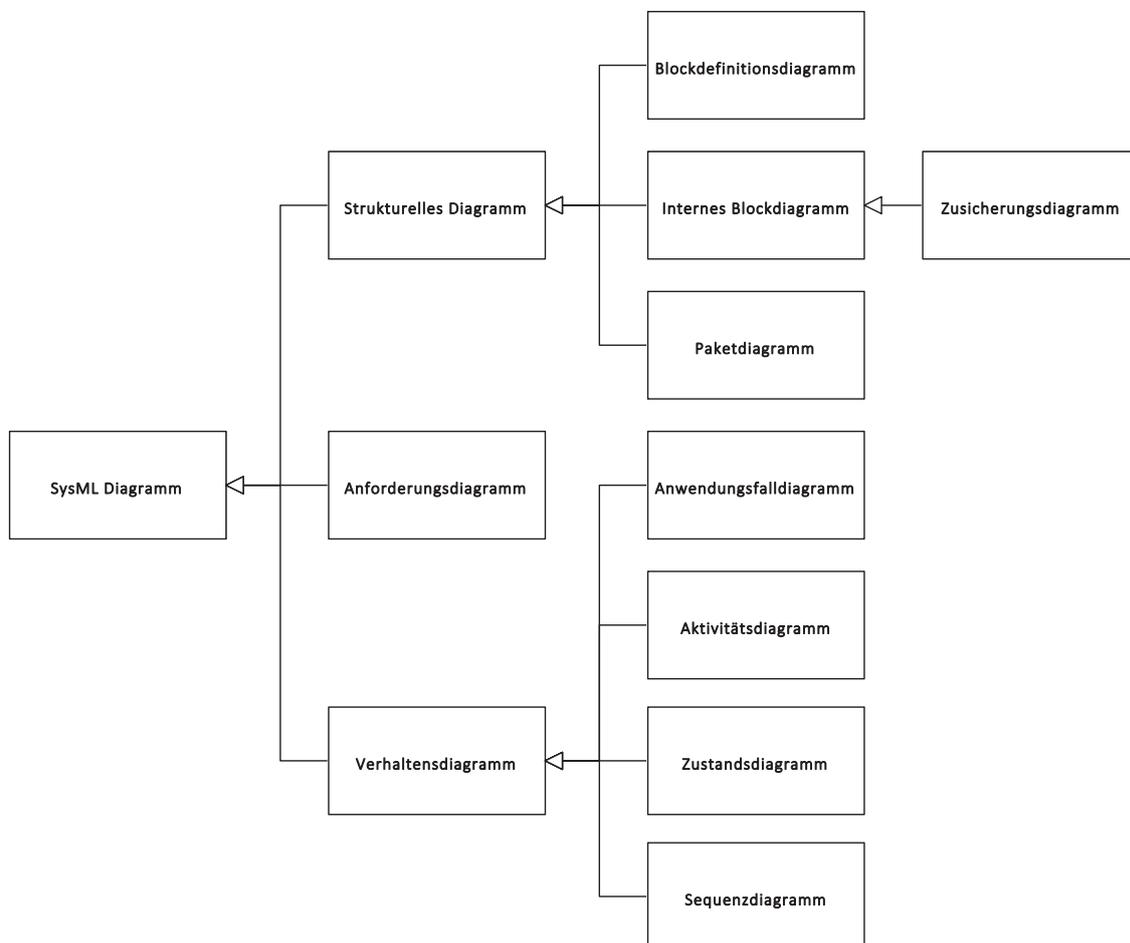


Abb. 3-2: Taxonomie der SysML Diagramme

Verhaltensdiagramme stellen das Systemverhalten dar. Die entsprechenden Diagramme sind Anwendungsfalldiagramme, Aktivitätsdiagramme, Zustandsdiagramme und Sequenzdiagramme. Zur Erfassung der Anforderungen stehen Anforderungsdiagramme zur Verfügung. Die genannten Diagrammtypen werden in den folgenden

⁷ WWW: <http://www.oose.de/nuetzliches/fachliches/sysml-werkzeuge/> und <http://sysml.tools/>

Abschnitten kurz vorgestellt. Für detaillierte Beschreibungen der Diagrammtypen und aller Elemente gilt der Verweis auf Norm und Fachliteratur zu Beginn von Abschnitt 3.2.

3.2.2.1 Blockdefinitionsdiagramm

Blöcke sind in SysML die Systembausteine und beschreiben somit die statische Struktur und die Operationen des Systems. Blöcke erhalten den Stereotypnamen <<block>>, der in der Notation auch entfallen darf [We14].

Das Beispiel in Abb. 3-3 zeigt ein Blockdefinitionsdiagramm (engl. Block Definition Diagram, bdd) für die Baugruppenstruktur eines Rillenkugellagers. Zentraler Block ist der Block Rillenkugellager. Das Rillenkugellager besteht aus den Bauteilen Außenring, Innenring, Kugel und Käfig. Diese Komposition zwischen dem Rillenkugellager und den Einzelteilen gibt auch gleichzeitig die entsprechenden Multiplizitäten an. In diesem Fall kommt jedes Teil, bis auf die Kugel, immer genau einmal im Rillenkugellager vor. Im Gegensatz zur Komposition bedeutet die Aggregation zwischen dem Stehlagergehäuse und dem Rillenkugellager, dass ein Rillenkugellager zwar Teil des Stehlagers sein kann, aber auch ohne das Stehlager existiert. Die Einzelteile des Rillenkugellagers existieren aufgrund der Komposition als Teil nur dann, wenn das Rillenkugellager existiert. Die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Einzelteilen bedeuten hier, dass der Käfig abhängig von den Kugeln sowie dem Innen- und Außenring ist. Über eine Generalisierung wird darüber hinaus festgelegt, dass das Rillenkugellager ein Wälzlager ist, also dessen Eigenschaften erbt.

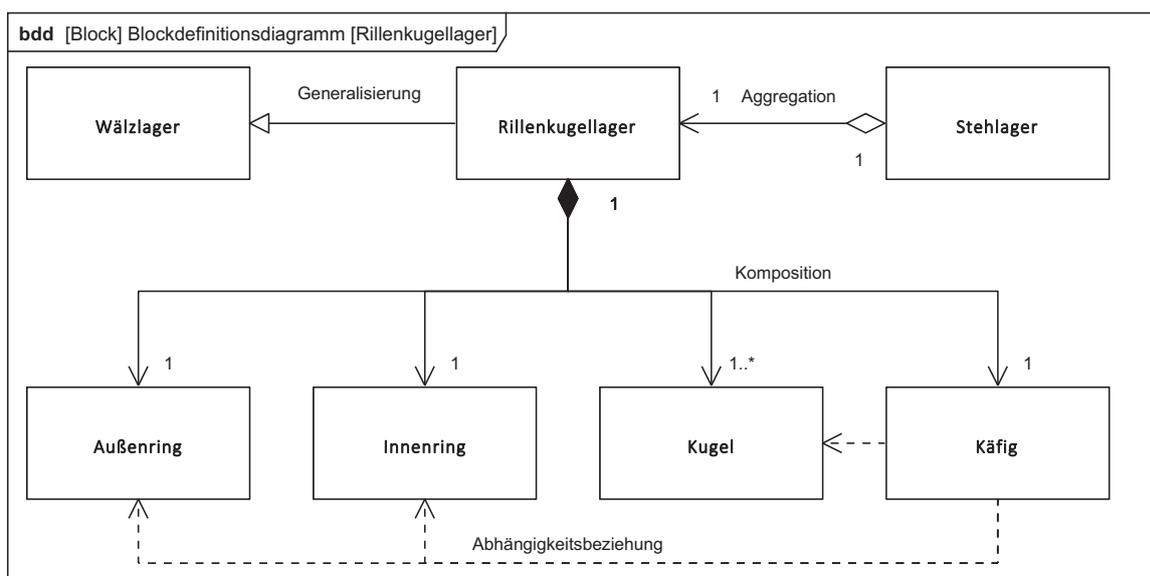


Abb. 3-3 SysML Blockdefinitionsdiagramm

3.2.2.2 Internes Blockdiagramm

Interne Blockdiagramme (engl. Internal Block Diagram, ibd) bilden die Struktur eines Blocks ab und beschreiben somit die Systemarchitektur. Dabei werden die Systemkomponenten als Instanzen von Blöcken abgebildet, die Schnittstellen und die Verbindungen zwischen den Schnittstellen als Konnektoren [Al12].

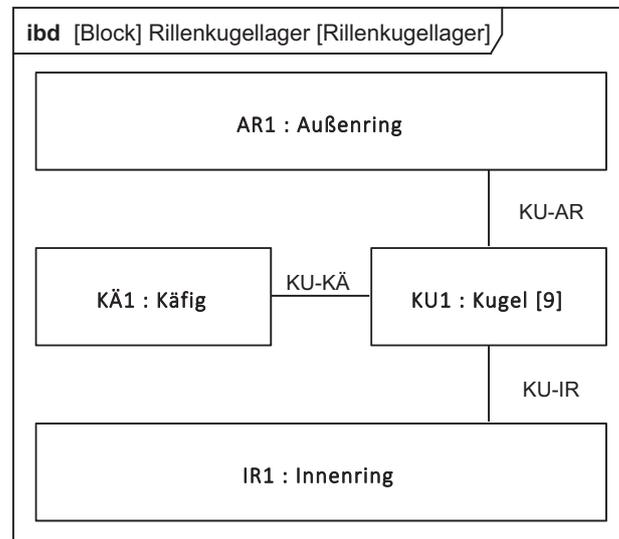


Abb. 3-4: SysML internes Blockdiagramm

Das in Abb. 3-4 dargestellte interne Blockdiagramm zeigt die Struktur des Blocks Rillenkugellager aus Abb. 3-3. Dargestellt sind die Verbindungen zwischen den insgesamt neun Kugeln, dem Außen- und Innenring und dem Käfig. Die einzelnen Komponenten sind Instanzen der zuvor definierten Blöcke.

3.2.2.3 Zusicherungsdiagramm

Zusicherungsdiagramme (engl. Parametric Diagram, par) erlauben die Darstellung von parametrischen Gleichungen und Beziehungen, vergleichbar mit Werkzeugen, wie Simulink. Zusicherungsdiagramme sind eine Form der internen Blockdiagramme. Für die Modellierung stehen spezielle Blöcke des Stereotyps <<constraintBlock>>, kurz <<constraint>> zur Verfügung [Al12], [We14].

Als Beispiel dient hier die Gleichung für die nominelle Lebensdauer von Wälzlagerungen, die als Zusicherungsdiagramm modelliert wird (Abb. 3-5).

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (3.1)$$

Die notwendigen mathematischen Operationen (vgl. [WiMu13]) sind als Zusicherungsbausteine abgebildet. Als Instanzen Quo und Pot bilden diese die erforderlichen

Rechenoperationen der Gleichung ab. Die Variablen und Ergebnisse werden als Instanzen der vorher definierten Werte eingesetzt.

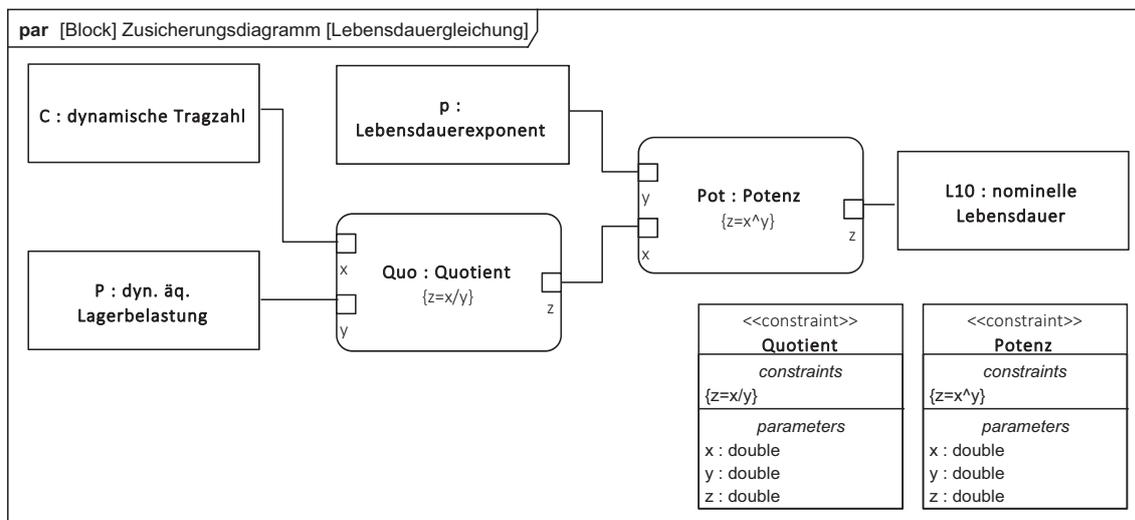


Abb. 3-5: SysML parametrisches Zusicherungsdiagramm

3.2.2.4 Paketdiagramm

Das Paketdiagramm (engl. Package Diagram, pkg) strukturiert die Modellelemente in der Modelldatenbank (siehe Abb. 3-9). Vergleichbar mit der Ordnerstruktur des Windows-Explorers werden so über- und untergeordnete „Verzeichnisse“ geschaffen. Diese Struktur kann einfach über Paketdiagramme angelegt und gepflegt werden [Al12].

3.2.2.5 Anforderungsdiagramm

Mit dem SysML Anforderungsdiagramm (engl. Requirements Diagram, req) werden die Anforderungen an das System erfasst. Eine Anforderung wird in SysML mit dem Stereotyp <<requirement>> erfasst. Eine Anforderung erhält hierbei immer eine eindeutige Kennung und einen beschreibenden Text. Als Attribute des Stereotyps <<requirement>> sind diese Informationen in jeder Anforderung des Modells schon beim Erzeugen angelegt [We14].

Das in Abb. 3-6 gezeigte Anforderungsdiagramm beinhaltet auszugsweise Anforderungen an ein Rillenkugellager. Das Rillenkugellager muss die Anforderung mit der ID 001 erfüllen. Dies wird über eine Erfüllungsbeziehung mit dem Stereotyp <<satisfy>> sichergestellt. Die Anforderung „Rillenkugellager“ ist eine übergeordnete Anforderung, welche in verschiedene Unteranforderungen zerlegt wird. Sind alle diese Unteranforderungen erfüllt, gilt die übergeordnete Anforderung ebenfalls als erfüllt (Nesting-Beziehung). Dabei wird die Anforderung an den Werkstoff z. B. aus der DIN EN ISO 683-3 abgeleitet (Ableitungsbeziehung). Diese definiert wiederum das

Material für den Innenring des Lagers, der dementsprechend diese Anforderung erfüllen muss.

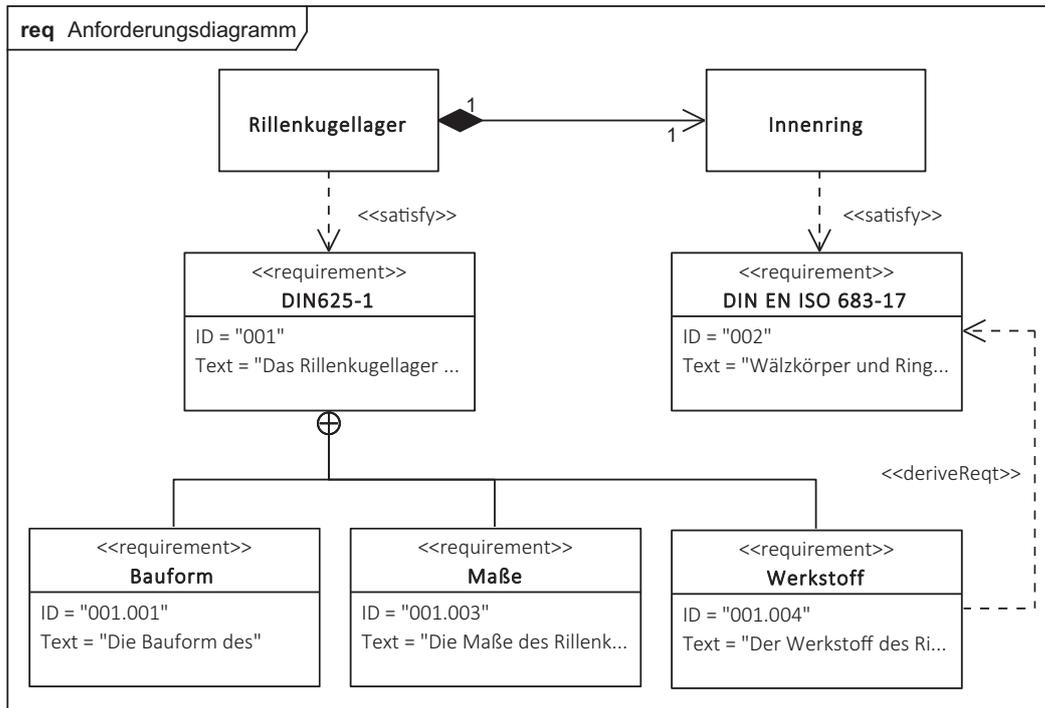


Abb. 3-6: SysML Anforderungsdiagramm

Neben der grafischen Darstellung als Diagramm erlaubt SysML die Darstellung von Anforderungen auch in tabellarischer Form.

3.2.2.6 Anwendungsfalldiagramm

Anwendungsfalldiagramme (engl. Use Case Diagram, uc) stellen die Grundlage der Verhaltensdiagramme in SysML dar. Hier können die Anwendungsfälle in einfacher Form dokumentiert werden. Dieser Diagrammtyp wurde unverändert von der UML übernommen [Al12], [We14].

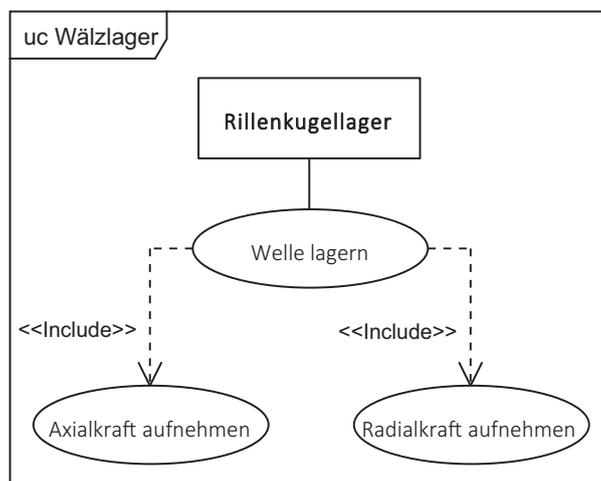


Abb. 3-7: SysML Anwendungsfalldiagramm

Das in Abb. 3-7 gezeigte Diagramm bildet den Anwendungsfall der Lagerung einer Welle ab. Über Enthältnisbeziehungen werden axiale und radiale Lagerung differenziert. Statt Blöcke können auch Akteure in Anwendungsfalldiagrammen genutzt werden, die i. d. R. menschliche Benutzer symbolisieren.

3.2.2.7 Aktivitätsdiagramm

Aktivitätsdiagramme (engl. Activity Diagram, act) dienen zur detaillierten Ablaufbeschreibung. Genutzt werden diese sowohl für die Modellierung von Prozessen als auch von Algorithmen und Operationen [We14].

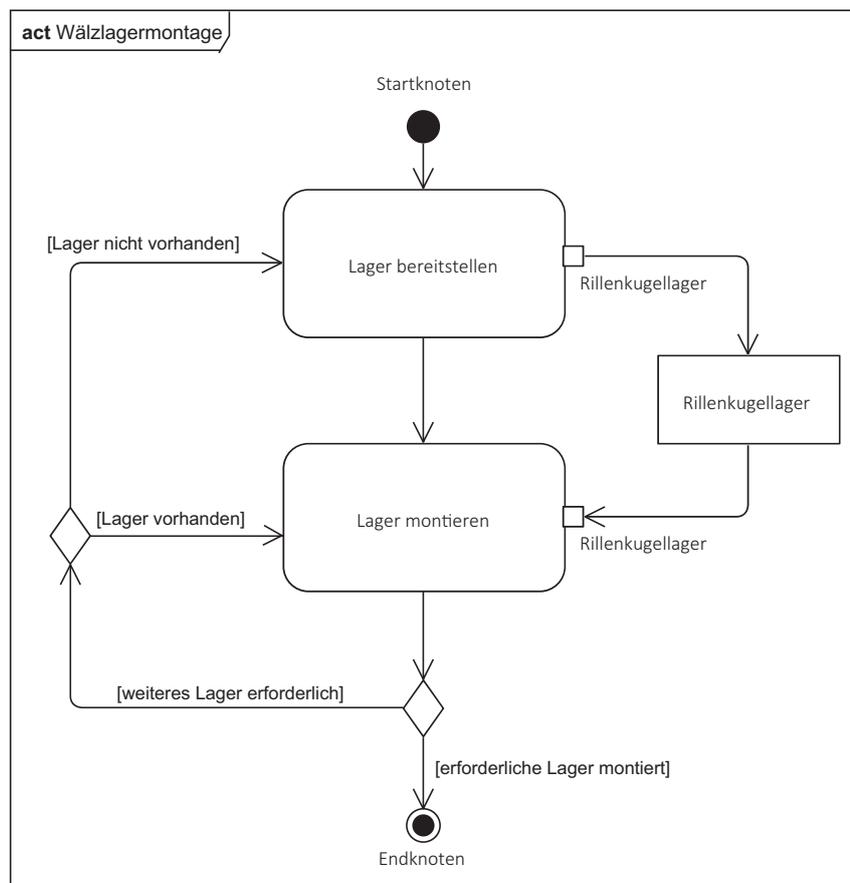


Abb. 3-8 SysML Aktivitätsdiagramm

Dabei ist eine Aktivität (Stereotyp <<activity>>) immer durch eine Abfolge von Aktionen (Stereotyp <<action>>) gekennzeichnet. Aktivitätsdiagramme können daher mit Ablaufdiagrammen verglichen werden. In Abb. 3-8 ist der Fall der Lagermontage dargestellt. Auf der rechten Seite ist über einen Objektfluss sichergestellt, dass bei der Montage ein Lager vorhanden ist. Dazu wird zunächst ein Lager in einem Objektknoten „zwischen gespeichert“. Zwischen den Aktionen der Lagerbereitstellung und Lagermontage stellen Kontrollflüsse den Ablauf sicher. Über diese werden auch die Abfrage und Entscheidung realisiert, bei weiteren erforderlichen Lagern zunächst neue Lager bereitzustellen.

3.2.2.8 Zustandsdiagramm

Das Zustandsdiagramm (engl. State Diagram oder State Machine Diagram, stm) ist ein unverändert von der UML übernommener Diagrammtyp. Zustandsdiagramme dienen zur Modellierung von Systemverhalten, z. B. Betriebszuständen. Dabei entspricht die Darstellung von Zuständen denen von Aktivitäten. Fehlt die Kennzeichnung des Diagrammtyps ist ohne Modelldatenbank nicht einfach nachvollziehbar, ob es sich um Zustände oder Aktivitäten handelt. [A12]

3.2.2.9 Sequenzdiagramm

Auch das Sequenzdiagramm (engl. Sequence Diagram, sd) wurde von der UML übernommen. Mit Sequenzdiagrammen lassen sich die Interaktionen zwischen den Systemkomponenten im zeitlichen Ablauf strukturieren. In horizontaler Richtung werden die Systemkomponenten und in vertikaler Richtung die Zeitachse angeordnet [A12].

Mit Sequenzdiagrammen können komplexe Abläufe, auch mit Schleifen und ähnlichen Funktionen, abgebildet werden. Dies führt jedoch leicht zu großen, unübersichtlichen Diagrammen. Sinnvoll ist beispielsweise die Beschreibung von Testfällen, bei denen der zeitliche Ablauf genau geplant werden kann [A12].

3.3 Modellstruktur des Lösungskonzepts

Die Strukturierung und Abbildung des Lösungskonzepts erfolgen in einem SysML-Modell. Als Modellierungswerkzeug wird die Software *Visual Paradigm V12.0*⁸ verwendet. Das Modell wird grob in die Pakete „CAD-CAM-Prozesskette“ und „Demonstrator“ gegliedert und ist abhängig von dem Paket „Stand der Technik“ (vgl. Abb. 3-9). Für die im Ansatz enthaltenen Pakete werden die Anforderungen als eigene Pakete abgebildet.

Die hierfür definierte Modellstruktur wird im Verlauf der Arbeit weiter detailliert. Die in Abb. 3-9 gezeigten Pakete bilden die in den folgenden Kapiteln vier und fünf beschriebenen, grundlegenden Elemente des Lösungsansatzes ab.

Aus Darstellungsgründen wird folgend auf die Diagrammrahmen verzichtet. Detailreiche Diagramme sind im Anhang in größerer Skalierung verfügbar.

⁸ WWW: <http://www.visual-paradigm.com/editions/community.jsp>

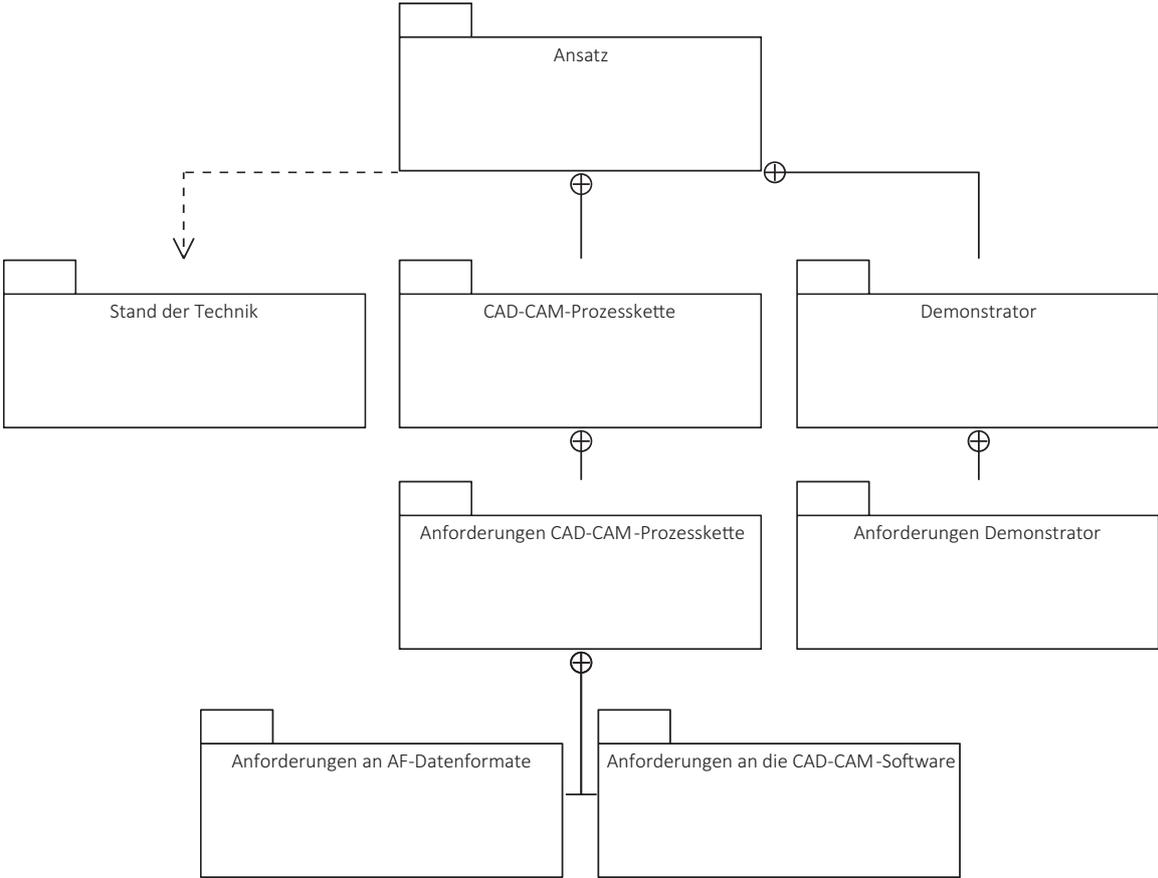


Abb. 3-9: Modellstruktur als SysML Paketdiagramm

4 Systematisierung und Vernetzung der Anforderungen

Als wesentliche Grundlage für die Entwicklung und Beschreibung einer Lösung erfolgt eine systematische Erfassung und Vernetzung der Anforderungen. Dazu werden, basierend auf der Problembeschreibung, zunächst die Anforderungen an die CAD-CAM-Prozesskette ermittelt. Ergänzend wird die gekühlte Leitschaufel einer Gasturbine als Anwendungsbeispiel genutzt, um anwendungsspezifische Anforderungen ebenfalls zu erfassen.

4.1 Problembeschreibung der CAD-CAM-Prozesskette

Derzeit ist die CAD-CAM-Prozesskette für additive Fertigungsverfahren als Vielzahl von verketteten Softwarelösungen ausgeprägt (siehe Aktivitätsdiagramm in Abb. 4-1). Üblicherweise wird die Gestalt des zu fertigenden Bauteils in einem 3D-CAD-System modelliert. Die Daten werden dann in Form des neutralen Datenformats STL exportiert (vgl. Abschnitt 2.2.1.1). Alternativ können native CAD-Daten in die prozessvorbereitende Software geladen werden, in der eine Tesselierung und Konvertierung in STL erfolgt. Eine Datenaufbereitung korrigiert anschließend ggf. entstandene Fehler. Die so aufbereiteten Daten werden in Folge von anwendungsspezifischer Software weiterverarbeitet. Durch diese Software wird abgesichert, dass eine fertigungsgerechte Ausprägung der Produktgestalt vorliegt. Dies wird beispielsweise durch das Erzeugen von erforderlichen Stützkonstruktionen (SK) erreicht. Schließlich werden die für die Fertigung erforderlichen Schicht- und Pfaddaten generiert und das Bauteil gefertigt. Üblicherweise liegen die benötigten Softwarewerkzeuge auf der Seite des Fertigungstechnologen bzw. Dienstleisters vor.

Ein Großteil des Know-how bei der Produktentwicklung für additiv herzustellende Bauteile liegt somit nicht auf der Seite des Konstrukteurs. Auch geometrische Operationen, die üblicherweise in den Bereich der Bauteilgestaltung fallen, erfolgen erst bei der Vorbereitung der additiven Fertigung auf Seite des Fertigungstechnologen bzw. Dienstleisters. Dies sind beispielweise boolesche Operationen und Skalierungen zur fertigungsgerechten Anpassung der Bauteile oder das Erzeugen von z. B. Leichtbaustrukturen. Das Aktivitätsdiagramm in Abb. 4-1 zeigt hier insbesondere den Einfluss der Bauteilorientierung auf die Schritte der Prozessvorbereitung. Da von dieser Operation viele der weiteren prozessvorbereitenden Schritte beeinflusst werden, ist die derzeit übliche späte Berücksichtigung der Bauteilorientierung ungünstig. Für eine optimierte Produktgestaltung spielt die Bauteilorientierung eine so große Rolle, dass diese von Beginn an bei der Gestaltung zu berücksichtigen ist.

Historisch bedingt ist die derzeitige Prozesskette aus dem Rapid Prototyping hervorgegangen. Hier wurden die herzustellenden Produkte jedoch nicht mit Blick auf

additive Verfahren gestaltet, sondern sollten letztlich konventionell gefertigt werden. In diesem Kontext ist die zuvor beschriebene Vorgehensweise als sinnvoll zu erachten. Wenn die additive Fertigung als Herstellungsverfahren für Endprodukte etabliert werden soll, muss jedoch eine bedarfsgerechte Anpassung der Prozesskette erfolgen.

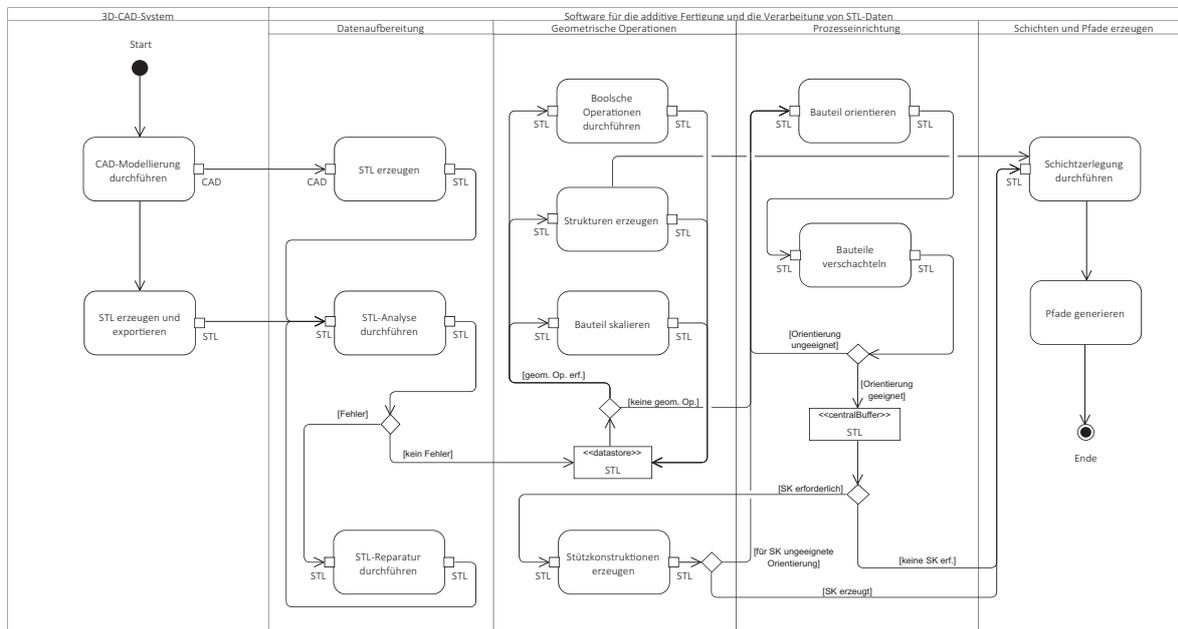


Abb. 4-1: Aktivitätsdiagramm bisheriger AF-CAD-CAM-Prozesse⁹

4.2 Anforderungen an eine bedarfsgerechte CAD-CAM-Prozesskette

Die Anforderungen an eine bedarfsgerechte CAD-CAM-Prozesskette lassen sich in den Teilbereichen Software und Datenformate erheben. Übergeordnete Anforderung ist vor allem das reibungslose Zusammenspiel zwischen den eingesetzten Softwarelösungen sowie den genutzten Formaten zum Datenaustausch. Nur so kann sichergestellt werden, dass genügend Akzeptanz für eine Nutzung vorliegt.

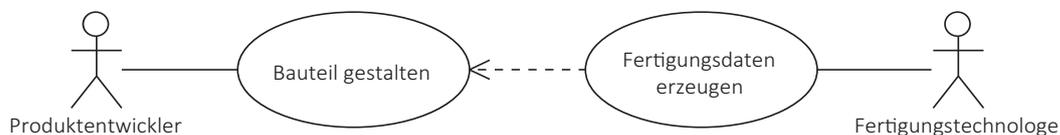


Abb. 4-2: Anwendungsfalldiagramm CAD-CAM-Prozesskette (vereinfacht)

Vereinfacht kann die Prozesskette mit einem Anwendungsfalldiagramm modelliert werden, welches die Abhängigkeit der Fertigungsdatenerzeugung von der Bauteilgestaltung deutlich macht. Die Modellierung von Anwendungsfällen ist zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung sinnvoll, da die Anwendungsfälle bereits zur Detaillierung der Anforderungen genutzt werden können. Die in Abb. 4-2 gezeigten Anwendungsfälle „Bauteil

⁹ Größere Skalierung: Anhang Abb. 8-1

gestalten“ und „Fertigungsdaten erzeugen“ sind im Anhang detailliert modelliert (Abb. 8-2 und Abb. 8-3).

4.2.1 Anforderungen an die CAD-CAM-Software

Die Anforderungen an die genutzte CAD-CAM-Software lassen sich zuerst allgemein erheben. Hier werden die verfügbaren Standards genutzt. Dies sind vor allem die [ISO9126] von 2001 und die 2011 als Aktualisierung veröffentlichten [ISO25010]. Diese Richtlinien beinhalten Lösungen zur Sicherstellung der Softwarequalität. Insbesondere bei der (Software-) Prototypenentwicklung sind diese Richtlinien und die damit entwickelten Bewertungskriterien nach *SQuaRE* (Qualitätskriterien und Bewertung von Softwareprodukten, engl. Software product Quality Requirements and Evaluation) als Leitfaden nutzbar [KoSz13]. Wesentliche Kriterien sind hier z. B. Funktionalität, Zuverlässigkeit, Benutzbarkeit, Effizienz, Änderbarkeit und Übertragbarkeit. Die Modellierung dieser Anforderungen als Anforderungsdiagramm ist im Anhang (Abb. 8-4) dargestellt.

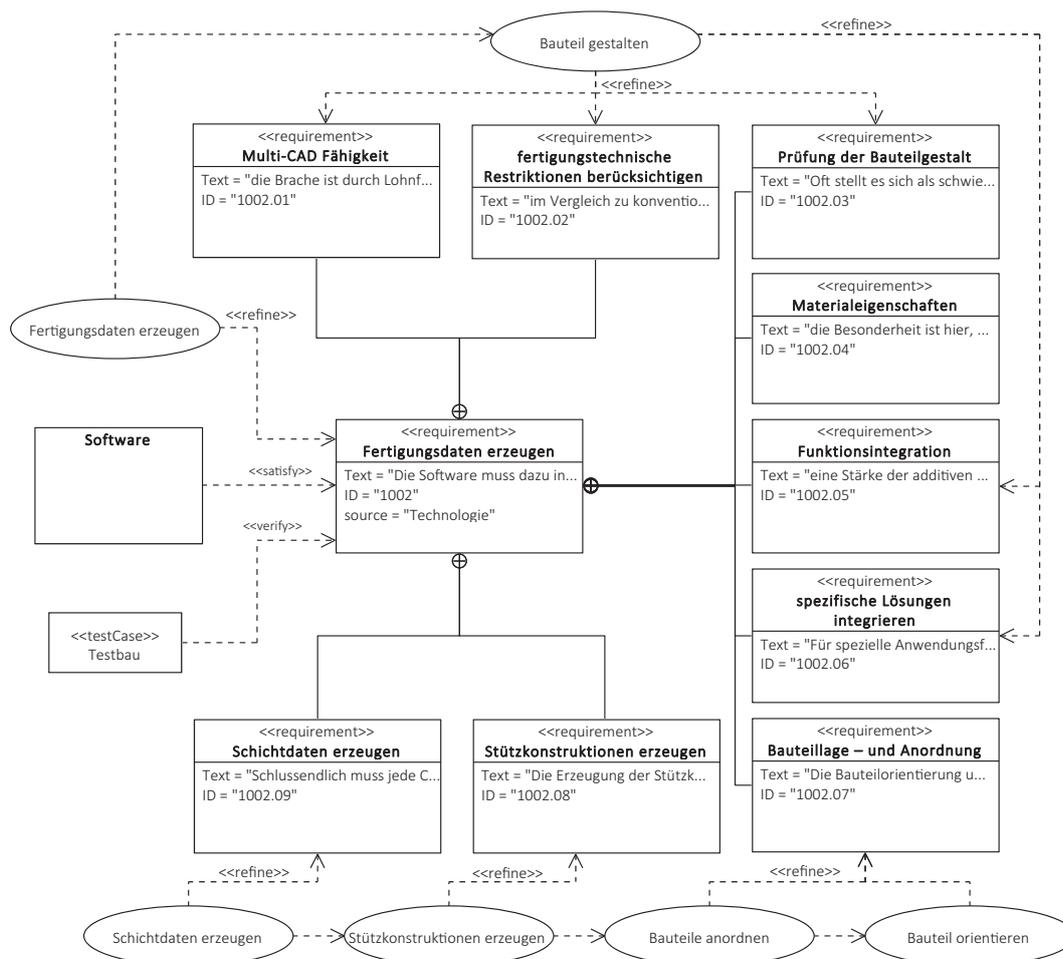


Abb. 4-3: Anforderungsdiagramm für die Erzeugung der Fertigungsdaten¹⁰

¹⁰ Größere Skalierung: Anhang Abb. 8-5

Für additive Fertigungsverfahren können spezifische Anforderungen an die CAD-CAM-Software festgestellt werden. Eine Modellierung dieser ist in Abb. 4-3 gezeigt. Die Anwendungsfälle „Bauteil gestalten“ sowie „Fertigungsdaten erzeugen“ dienen, zusammen mit untergeordneten Anwendungsfällen, als Verfeinerung der nachfolgend beschriebenen Anforderungen:

- *Multi-CAD*: Die Branche ist durch Lohnfertigung bzw. Dienstleistung geprägt. Nach einer Roland Berger Studie gibt es weltweit (Stand November 2013) mehr als 90 Dienstleister mittelständischer Ausprägung, die additive Fertigung für Metallbauteile anbieten [EiLa13]. Daneben verfügen vor allem große Industrieunternehmen über eigene Fertigungsanlagen. Diese Struktur erfordert die Unterstützung und das Zusammenwirken verschiedener CAD-Systeme in der CAD-CAM-Prozesskette. Ohne eine breite Anwendbarkeit mit Einbeziehung der gängigen CAD-Systeme ist eine Etablierung nicht denkbar.
- *Berücksichtigung von fertigungstechnischen Restriktionen bei der Gestaltung*: Im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren zeichnen sich die additiven Fertigungsverfahren vor allem durch die Gestaltungsfreiheiten aus, die durch die werkzeuglose Fertigung bedingt sind. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger, die bekannten Restriktionen derart bei der Gestaltung der Bauteile zu berücksichtigen. Dies sind insbesondere die fertigen Bauteilabmessungen, die Gewährleistung der Entformbarkeit bzw. der Pulverentfernung, die erforderlichen Stützkonstruktionen und in diesem Zusammenhang die prozessbedingte thermische Belastung des Bauteils während der Fertigung. Daher sind Funktionen und Features zu integrieren, die den Konstrukteur hinsichtlich dieser Besonderheiten unterstützen.
- *Prüfung der Bauteilgestalt*: Oft stellt es sich als schwierig dar, alle prozessspezifischen Restriktionen umfassend als Features bei der Gestaltung einzubinden. Dies ist bezüglich additiver Fertigungsverfahren schon durch die Andersartigkeit der verfügbaren Maschinen und Prozessparameter bedingt. Daher sind geeignete Analysefunktionen erforderlich, die während und nach dem Konstruktionsprozess prozessspezifische Prüfungen der Geometrie durchführen können. Entsprechende Ergebnisse können dann zur Optimierung der Bauteilgestalt verwendet werden, bevor die Fertigungsplanung erfolgt. Erforderliche Prüfungen sind z. B. die Wanddickenprüfung, die Prüfung auf Materialanhäufungen sowie Schrägenprüfung u. a.
- *Materialeigenschaften*: Eine Besonderheit ist hier, dass die Materialeigenschaften durch den Fertigungsprozess direkt beeinflusst werden [Se10]. So führen Variationen der Prozessparameter zu unterschiedlichen Ergebnissen bei gleichem Ausgangsmaterial. Auf diese Weise können diese Eigenschaften gezielt gesteuert werden. Es können beispielsweise bereichsweise unterschiedliche bzw. gradierte Materialeigenschaften abgebildet werden. Dies muss bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt werden. Ebenso ist es erforderlich, die Informationen so zu übergeben,

dass die richtigen Parametersätze bei der Prozessvorbereitung zugeordnet werden können.

- *Funktionsintegration:* Eine Stärke der additiven Fertigung liegt in den Möglichkeiten zur Funktionsintegration. So lassen sich beispielsweise Leichtbau- oder Gitterstrukturen direkt mitgestalten [MaKö13b], [SeMa14]. Auch Kühlkanäle, z. B. zur konturnahen Kühlung von Spritzgießwerkzeugen, sind direkt integrierbar [SeOt12]. Es muss sichergestellt werden, dass diese Elemente bei der CAD-Modellierung aufgeprägt und dann durch Weitergabe in der CAD-CAM-Prozesskette als Schicht- bzw. Pfaddaten mit abgebildet werden können.
- *Berücksichtigung der Bauteillage- und Anordnung:* Die Bauteilorientierung und die damit verbundene Anordnung mehrerer Bauteile sind bedeutende Einflussfaktoren für die erzielbare Bauteilqualität [Da10]. Diese Punkte sind somit durchgängig zu integrieren. Von der Modellierung bis zur Vorbereitung der Fertigungsdaten muss eine Anpassung der Bauteilorientierung möglich sein. Hier müssen die zuvor genannten Analysen genutzt werden, um bei Änderungen der Orientierung die Auswirkungen dieser Operation auf die Bauteile zu überwachen. Diese sind vor allem der resultierende Treppenstufeneffekt und die Stützkonstruktionen.
- *Erzeugung von Stützkonstruktionen:* Die Erzeugung der Stützkonstruktion ist eine wesentliche Aufgabe von CAM-Software für additive Fertigungsverfahren. Ohne Stützkonstruktionen sind pulverbasiert-hergestellte Metallbauteile nicht fertigbar. Daher müssen die Stützkonstruktionen in der gesamten CAD-CAM-Prozesskette berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für die automatisierte Erzeugung der Stützkonstruktionen, die Übergabe der Stützkonstruktionsdaten sowie die durchgehende Prüfung auf SK-Notwendigkeit. Da durch angepasste Gestaltung und Bauteilorientierung Stützkonstruktionen vermieden werden können, sind diese drei Punkte immer im Zusammenhang zu betrachten. Weitere Effekte, wie die durch die Stützkonstruktionen erfolgende Wärmeregulierung, müssen ebenfalls mit berücksichtigt werden.
- *Integrierbarkeit spezieller Lösungen:* Für spezielle Anwendungsfälle hat es sich bewährt, entsprechend angepasste Lösungen bereitzustellen. Zu nennen ist hier z. B. die Dentaltechnik. Insbesondere für den Aufbau von Zahnersatz gibt es Softwarelösungen, die von der Vermessung bis hin zur additiven Fertigung durchgehende Konzepte anbieten. Daher ist die Integrierbarkeit branchen- und anwendungsspezifischer Lösungen ein wichtiger Bestandteil.
- *Erzeugung von Schichtdaten:* Letztlich muss jede CAD-CAM-Lösung für additive Verfahren dazu in der Lage sein, Schicht- und Pfaddaten zu erzeugen. Ohne diese Daten kann eine schichtweise Fertigung nicht erfolgen.

4.2.2 Anforderungen an AF-Datenformate

Die CAD-CAM-Prozesskette setzt voraus, dass die Daten an eine Maschine für die additive Fertigung übertragen werden. Derzeit ist die Datenübergabe vorrangig durch das STL-Format geprägt. Eine direkte Integration der einzelnen Softwarewerkzeuge ist nicht vorhanden. Geometriedaten werden importiert, bearbeitet und dann wieder exportiert. Dabei gehen Metadaten verloren oder müssen auf anderen Wegen übertragen werden. Im Rahmen der Entwicklungen zum AMF-Format wurde durch Lipson und Hiller eine Befragung durchgeführt, mit dem Ziel die Anforderungen an ein Datenformat für die additive Fertigung zu gewichten (siehe Abb. 4-4).

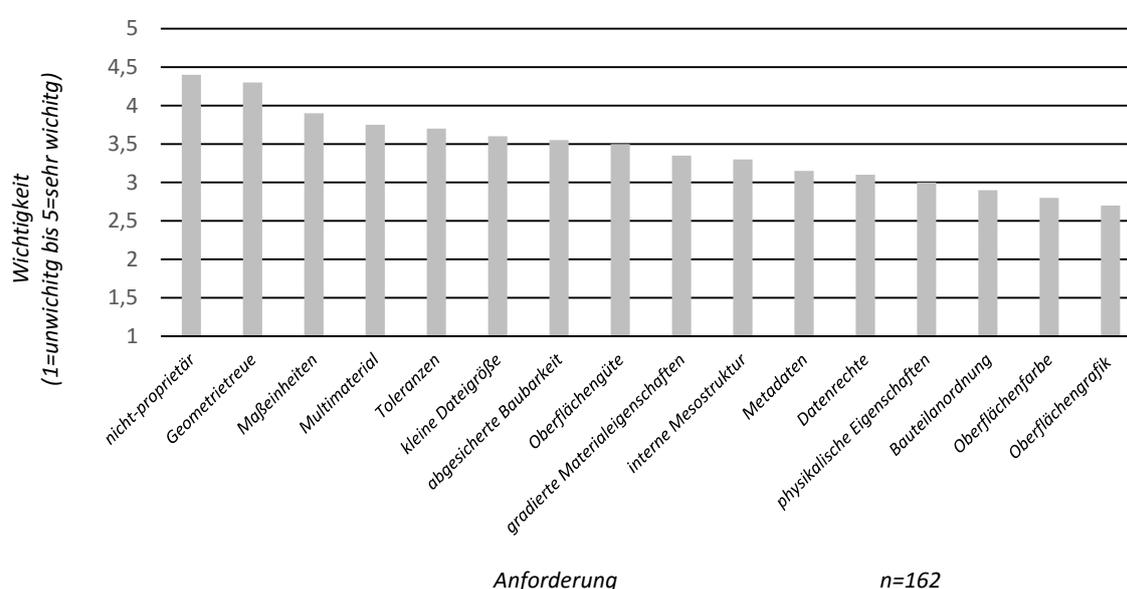


Abb. 4-4: Anforderungen an AMF nach Lipson und Hiller [LiHi04]

Die Befragung ergab vor allem, dass das Datenformat nicht-proprietär¹¹ mit einer hohen Geometrietreue sein sollte. Weniger Wert wurde auf optische Ausprägungen wie Oberflächengrafiken oder -farbe gelegt.

In Summe muss das Format vor allem die Werkzeuge unterstützen, die in der CAD-CAM-Prozesskette zur Verfügung gestellt werden. Dies entspricht den in Abschnitt 4.2.1 skizzierten Anforderungen. Die Abb. 8-6 im Anhang zeigt die Anforderungen nach Lipson und Hiller als SysML Anforderungsdiagramm.

¹¹ „Protokolle, Dateiformate und Ähnliches werden als „proprietär“ bezeichnet, wenn sie nicht oder nur mit Schwierigkeiten von Dritten implementierbar und deshalb nicht zu öffnen oder zu lesen sind, weil sie z. B. lizenzrechtlich, durch herstellerepezifisches Know-How oder durch Patente beschränkt sind“ [Wikipedia: Proprietär].

4.3 Demonstrator Gasturbinenleitschaufel

Die Anwendung additiver Technologie ist so vielfältig, dass es im Rahmen dieser Arbeit als sinnvoll erachtet wird, den Lösungsansatz anhand eines konkreten Beispiels zu entwickeln. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Leitschaufel einer stationären Gasturbine als Demonstrator gewählt worden. Die Abb. 4-5 zeigt den Baugruppenzusammenhang bis auf die Ebene der Leitschaufel in einem Blockdefinitionsdiagramm.

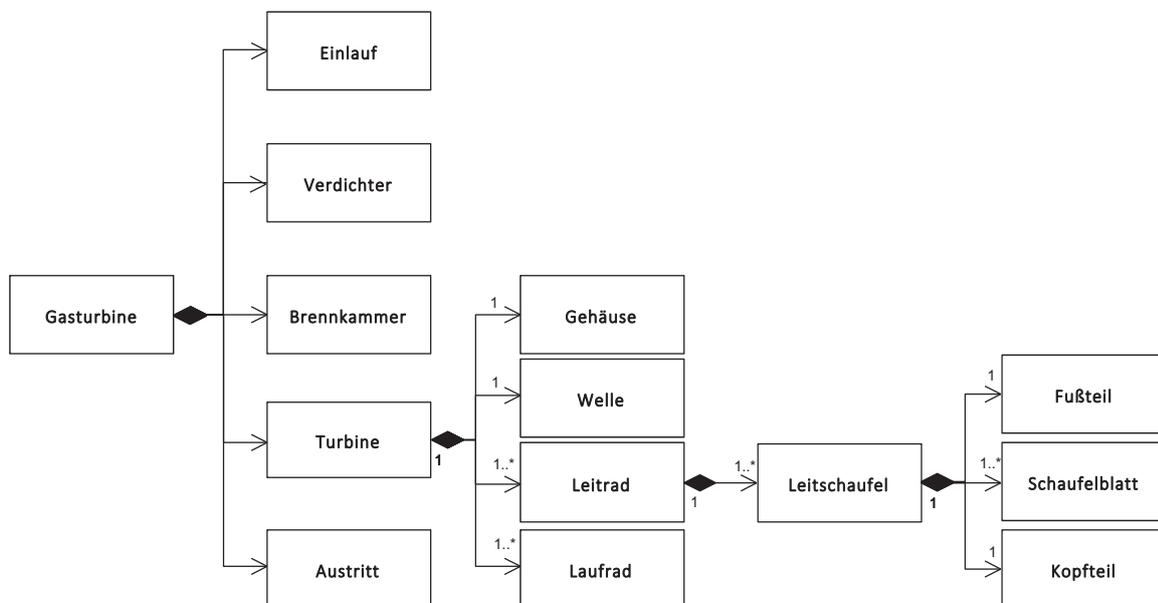


Abb. 4-5: Blockdefinitionsdiagramm einer Gasturbine (vereinfacht)

4.3.1 Eigenschaften der Gasturbinenleitschaufel

Turbinenschaufeln bieten additiven Fertigungsverfahren ein Anwendungsfeld das Potenzial aufzeigt. Dies liegt vor allem an der komplexen 3D-Geometrie. Die Turbinenschaufeln bestehen im Wesentlichen aus dem Schaufelblatt, welches Kopf- und Fußteil der Leitschaufel verbindet (Abb. 4-6). Die feststehenden Leitschaufeln führen die Heißgasströmung in axialer Richtung und dienen zur Expansion und Beschleunigung der Strömung sowie zur Umlenkung in Umfangsrichtung [Le10].

Gehäuseseitig werden die Leitschaufeln am Fußteil über Stege o. ä. direkt am Gehäuse oder in Leitschaufelträgern bzw. mit Zwischenringen befestigt. In vergleichbarer Form erfolgen nabenseitige Befestigungen über die Kopfplatte. Geometrisch ist schon diese Grobgestalt der Leitschaufel so komplex, dass additive Fertigungsverfahren, wie Laser-Strahlschmelzen, eine wirtschaftliche Alternative darstellen können. Wesentlich ist hier jedoch die Fähigkeit, auch komplexe 3D-Oberflächen herzustellen. Fertigungstechnische Restriktionen, die durch Gießen oder mechanische Bearbeitung bestehen, können zugunsten der aerodynamisch optimierten Gestalt reduziert werden. Herkömmliche Restriktionen sind beispielsweise gerade Hinterkanten der Schaufelblätter

oder gerade Wände in radialer Richtung zum vereinfachten Einbringen von Kühlluftensätzen. [Le10]

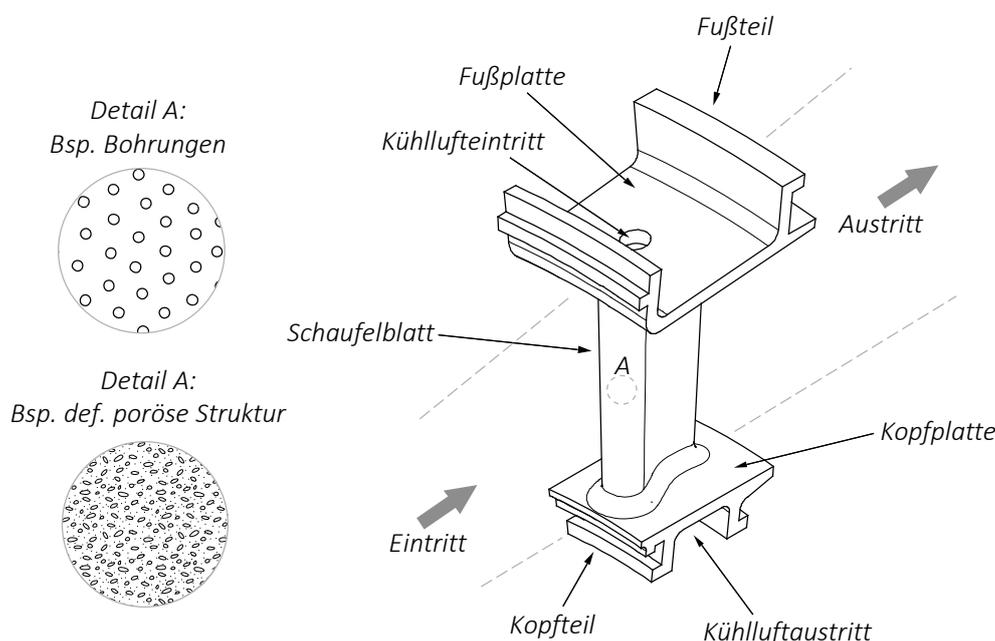


Abb. 4-6: Turbinen-Leitschaufel (schematisch)

Gerade in den ersten Stufen sind die Leitschaufeln hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. Grund hierfür ist vor allem, dass höhere Betriebstemperaturen des Heißgases auch zu einer Steigerung des Wirkungsgrads führen. Um diese Hochtemperaturfähigkeit der Schaufeln zu verbessern, wurden neben den Werkstoffen auch die Kühlverfahren weiterentwickelt. Wesentliche Kühltechniken sind die konvektive Kühlung, die Prall- und die Filmkühlung. Konvektiv gekühlte Schaufeln (Bsp. siehe Abb. 4-7 a) sind dadurch ausgeprägt, dass das Kühlmedium (i. d. R. abgezwigte Verdichterluft) durch Kühlkanäle o. ä. Strukturen (Rippen, Pins etc.) geleitet wird und so eine konvektive Kühlung der Schaufel erfolgt.

Der Wirkungsgrad kann durch die Kombination mit einer Prallkühlung gesteigert werden (vgl. Abb. 4-7 b). Ein Prallkühleinsatz, z. B. ein Lochblech, wird in die Schaufel eingeschoben. Das Kühlmedium strömt hier durch definierte Öffnungen in dem Prallkühleinsatz auf die Innenoberfläche des Schaufelblatts. So kommt es zu einer effektiveren Kühlung der Schaufel als bei rein konvektiv gekühlten Lösungen [Kl01]. Im Bereich der Hinterkante kann eine konvektive Kühlung erreicht werden, indem das Kühlmedium an Pins oder Rippen vorbeiströmt. Eine noch effektivere Methode ist die Filmkühlung (Abb. 4-7 c). Bohrungen an der Schaufeloberfläche lassen das Kühlmedium austreten, das dann eine Sperrschicht um das Schaufelblatt bildet. Diese Technologie ist bei größeren Gasturbinen Stand der Technik [FuSu04], [Ki08].

Schwierigkeiten treten vor allem bei Kleingasturbinen auf. Baugrößenbedingt sind hier fertigungstechnische Restriktionen bezüglich der internen Kühlluftführung und Boh-

runge feststellbar. Eine Kombination der o. g. Techniken steigert die Komplexität zusätzlich (vgl. z. B. [AcDe06], [BeJo03], [Kl01], [Ti05]). Somit entsteht aus dem Bauteil Leitschaufel schnell eine komplexe Baugruppe, bestehend aus der äußeren Geometrie von Schaufelblatt, Kopf- und Fußteil und verschiedenen Einsätzen für die Kühlluftführung.

Neben den erprobten Kühltechniken bieten additive Technologien hier die Möglichkeit, die Materialeigenschaften über die Steuerung der Fertigungsparameter zu beeinflussen. So kann anstatt von Bohrungen auch eine definierte poröse Struktur zum Leiten der Kühlluft an die Schaufeloberfläche als Lösung diskutiert werden. Detail A in Abb. 4-6 zeigt diese mögliche Vorgehensweise.

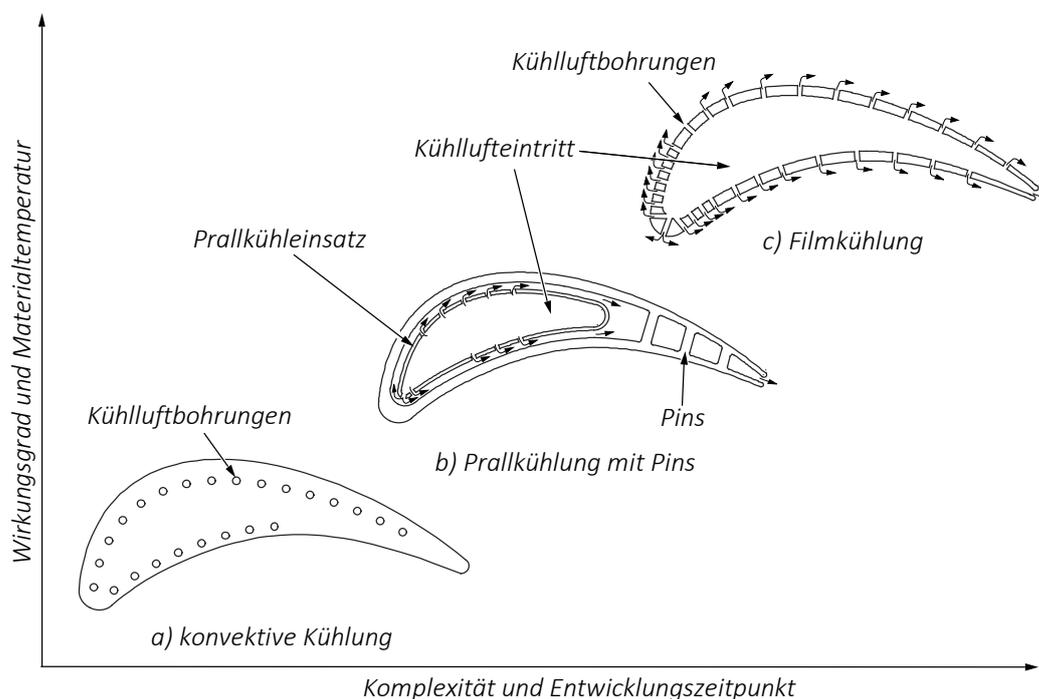


Abb. 4-7: Kühlverfahren für Turbinenschaufeln

4.3.2 Modellierung der Demonstrator-Anforderungen

Basierend auf den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Zusammenhängen werden im Folgenden die Anforderungen an die Leitschaufel erfasst. Die Modellierung erfolgt als Anforderungsdiagramm (Abb. 4-8). Wesentlich sind die Erhöhung des Wirkungsgrads und die mechanische Belastbarkeit der Leitschaufel. Die Erhöhung des Wirkungsgrads beinhaltet Anforderungen an die Bauteilgeometrie und die möglichen Betriebstemperaturen. Die Anforderung an höhere Betriebstemperaturen beinhaltet zum einen die Anforderung an die Kühlung der Geometrie. Hiervon kann auch die Anforderung an die Leitung des Kühlmediums abgeleitet werden. Zum anderen muss eine höhere thermische Belastbarkeit gewährleistet werden. Hiervon ist wiederum die mechanische Belastbarkeit der Schaufel abhängig.

Die Anforderungen an die Geometrie werden von entsprechenden Anwendungsfällen detailliert. So verfeinert z. B. der Anwendungsfall „Heißgas umlenken“ die Anforderungen an die 3D-Schaufelblattgeometrie. Die Anwendungsfälle zum Führen, Beschleunigen und Expandieren des Heißgases dienen der Verfeinerung von Anforderungen an Fuß- und Kopfteilgeometrie.

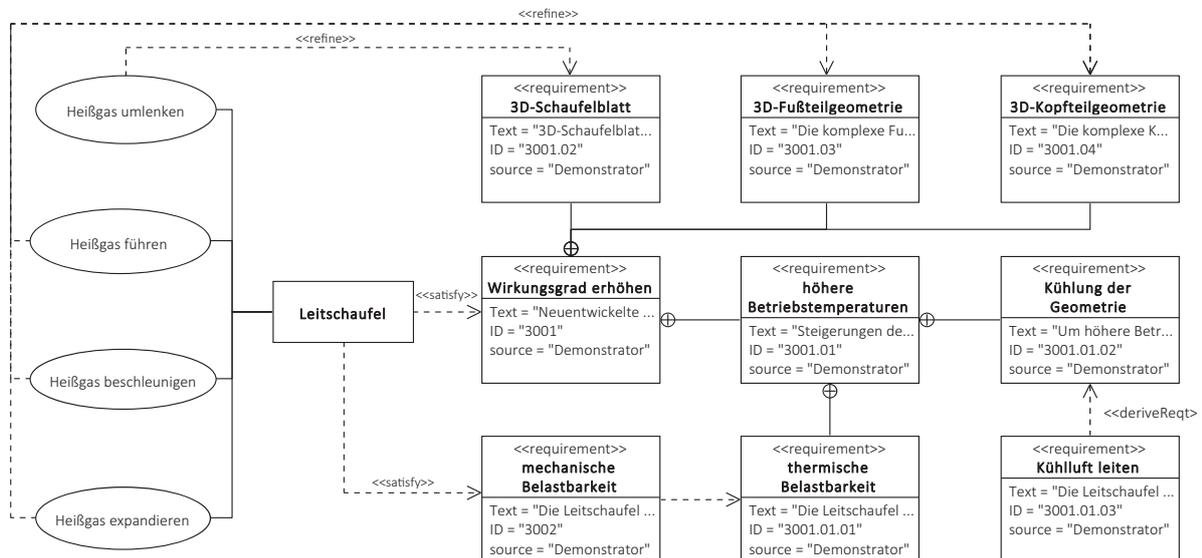


Abb. 4-8: Anforderungsdiagramm für die Leitschaufel¹²

Die in diesem Kapitel beschriebenen Anforderungen dienen als Grundlage für das entwickelte Lösungskonzept.

4.4 Grobgestaltung von Anwendungsfällen

Bevor im folgenden Kapitel Lösungsansätze aus Wissenschaft und Technik recherchiert werden, erfolgt eine Grobgestaltung der benötigten Anwendungsfälle. Die in diesem Rahmen identifizierten Anwendungsfälle dienen zur Orientierung bei der Recherche von bestehenden Lösungsansätzen. Sie bilden somit, zusammen mit den Anforderungen, die Entwicklungsgrundlage für das zu erarbeitende Modell.

Prinzipiell soll die Aufgabentrennung zwischen CAD- und CAM-Software zunächst erhalten bleiben (vgl. Abb. 4-9). Jedoch werden in der CAM-Umgebung wieder mehr die Aufgaben fokussiert, die direkten fertigungsvorbereitenden Bezug haben. Diese sind insbesondere das Erzeugen der Fertigungsdaten sowie die prozessbedingte Anpassung von Orientierung, Verschachtelung und Stützkonstruktionen. Vorgesehen ist hier, dass diese Operationen nicht basierend auf STL- sondern auf Schichtdaten erfolgen. Somit ergibt sich die in Abb. 4-9 gezeigte logische Abhängigkeit der CAM- von der CAD-Seite.

¹² Größere Skalierung: Anhang Abb. 8-7

Darüber hinaus ist der wesentliche Unterschied zu der bisherigen Vorgehensweise (vgl. Abb. 4-1), dass Orientierung, Verschachtelung und Stützkonstruktionen schon bei der CAD-Modellierung berücksichtigt werden. Das Know-how des Fertigungstechnologen wird dazu durch Wissensintegration schon bei der CAD-Modellierung verfügbar gemacht, so kann das Fertigungswissen kontinuierlich in die Gestaltung einfließen. Die Einstellung und Optimierung der Fertigungsparameter und die Erzeugung der Fertigungsdaten erfolgt weiterhin durch den Fertigungstechnologen.

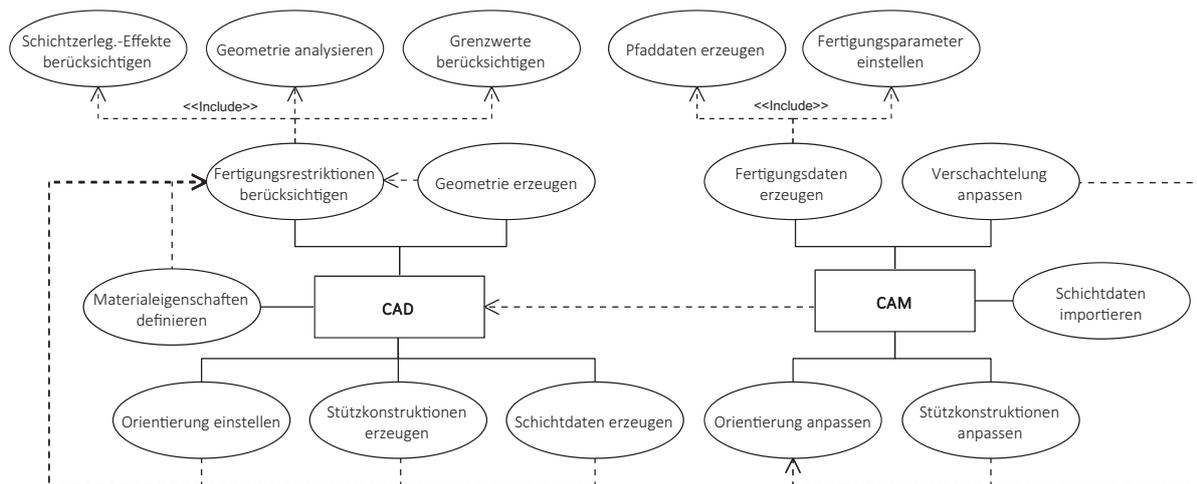


Abb. 4-9: Lösungskonzept als Anwendungsfalldiagramm¹³

Der Fokus bei der Entwicklung liegt somit auf Erweiterung der CAD-Seite, hin zu einer funktions- und fertigungsbezogeneren Entwicklungsumgebung. Durch die Integration von spezifischen Modulen soll der Konstrukteur erweiterte Materialeigenschaften definieren und Orientierung sowie Stützkonstruktionen bereits im CAD-Modell verankern können. Dies führt dazu, dass der Export von Schichtinformationen erforderlich wird, um beispielsweise die Materialeigenschaften schichtbezogen zu übergeben. Dies bedeutet jedoch auch, dass auf der CAM-Seite keine vollständige Neuorientierung des Bauteiles mehr erfolgen kann, sondern die Freiheitsgrade auf die Translation des Bauteiles und die Rotation um die Z-Achse beschränkt sind.

Eine Erweiterung dient hier insbesondere dazu, fertigungsbezogene Restriktionen bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Dies erfolgt durch Berücksichtigung von Schichtzerlegungseffekten, wie dem Treppenstufeneffekt. Geometrieanalysen und Prüfungen von Grenzwerten (z. B. der zulässigen Wanddicke) ergänzen die Entwicklungsumgebung.

Abschließend wird ein Vorschlag entwickelt, wie eine vollständige Integration der CAM-Werkzeuge in einer CAD-CAM-Umgebung erfolgen kann, d. h., wie die zunächst vorgesehene Trennung von CAD und CAM Werkzeugen durch eine umfassende Lösung substituiert werden kann.

¹³ Größere Skalierung: Anhang Abb. 8-8

5 Lösungsansätze für identifizierte Anforderungen und Anwendungsfälle

In den folgenden Abschnitten werden Lösungen für die ermittelten Anforderungen und Anwendungsfälle aus Kapitel 4 ermittelt. Dazu werden zum einen dokumentierte Ansätze aus der Wissenschaft beschrieben, zum anderen wird ein Überblick über bereits erhältliche Softwarelösungen zu den identifizierten Teilproblemen gegeben. Da es sich bei den betrachteten Pre-Prozess-Schritten für die additive Fertigung um ein breites und dynamisches Forschungsfeld handelt, wird an dieser Stelle kein Anspruch auf vollständige Betrachtung aller bekannten Lösungsansätze erhoben.

5.1 Bauteilorientierung- und Anordnung

Die Ermittlung der optimalen Bauteilorientierung- und Anordnung ist einer der wesentlichen Faktoren zur Beeinflussung der Bauteilqualität [AlA198], [Da10], [VDI3405-3]. Qualitätssteigerungen können vor allem dann erreicht werden, wenn die Bauteilorientierung bereits bei der Gestaltung des Bauteils berücksichtigt wird [HuNo14], [PoKe14], [VDI3405-3]. Ebenfalls beeinflussen die Bauteilorientierung- und Anordnung die Fertigungskosten [ZäHa06].

5.1.1 Bauteilorientierung

Eine umfassende Untersuchung von Ansätzen zur Optimierung der Bauteilorientierung erfolgte an der Universität Duisburg-Essen im Rahmen des DFG-Projekts „*Multiziel-Optimierung des Pre-Prozesses zur Qualitätssicherung additiv gefertigter Bauteile*“ (KO 1620/11-1, WI 2118/4-1) [KöWi15]. Danjou beschreibt in seiner mit diesem Projekt verknüpften Dissertation „*Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie*“ einen auf STL-basierenden Lösungsweg [Da10]. Das Optimierungskonzept basiert auf einem genetischen Algorithmus, welcher die Eingabedaten (Technologieparameter, wie Schichtdicken, SK-Grenzwinkel etc.) und die STL-Daten des Bauteils verarbeitet, bis ein dem jeweiligen Optimierungsziel entsprechendes Ergebnis erreicht wird. Es werden zunächst die eingegebenen Technologiedaten und das STL-Netz des zu optimierenden Teiles eingelesen. Dieses Netz wird dann so aufbereitet, dass redundante und nicht weiter benötigte Informationen entfernt werden, wobei gleichzeitig fehlende Nachbarschaftsbeziehungen erzeugt werden. Im Anschluss wird noch eine konvexe Hülle des Netzes erzeugt, welche für einige Berechnungsschritte ausreichend genau, jedoch in ihrer Komplexität reduziert ist. Anschließend wird der Prozess gestartet und die Initialpopulation erstellt. Folgend werden durch die Funktion des genetischen Algorithmus iterativ neue Generationen und Individuen erzeugt sowie bewertet, wobei jedes Indivi-

duum eine neue Orientierung des Bauteils repräsentiert. Für jede Orientierung werden die relevanten Aspekte Bauteilhöhe, Oberflächenqualität, Verzug, Stützkonstruktionen und Fertigungskosten quantifiziert und mithilfe einer Fitnessfunktion zusammengefasst. Hierbei kann der Nutzer die einzelnen Aspekte so gewichten, dass entweder eine Multizielanalyse erfolgt oder nur einzelne bzw. ausgesuchte Faktoren erfasst werden. Letztlich wird die Orientierung, für welche die Fitnessfunktion den besten Wert liefert, als Vorschlag für den Nutzer in Form einer STL-Datei mit entsprechendem Koordinatensystem exportiert.

Die Evaluierung des Ansatzes von Danjou ergab, dass die vom Optimierungsalgorithmus ermittelten Orientierungen brauchbare Lösungen darstellen. So konnte z. B. festgestellt werden, dass die vom Optimierer angenommene Oberflächengüte mit den real gemessenen Werten in Übereinstimmung gebracht werden kann. Die Abb. 5-1 stellt die virtuellen, mittels Spitzenhöhe (vgl. 2.2.1.4) ermittelten Gütwerte für einzelne Flächen und Schichtdicken (0,08 bis 0,14 mm) mit der an Probenkörpern gemessenen Oberflächengüte gegenüber. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Annahme, die Oberflächengüte über die Spitzenhöhe zu qualifizieren, hier zu nachvollziehbaren Ergebnissen führt. Das Beispiel bezieht sich auf das Verfahren Laser-Sintern [ReMa13].

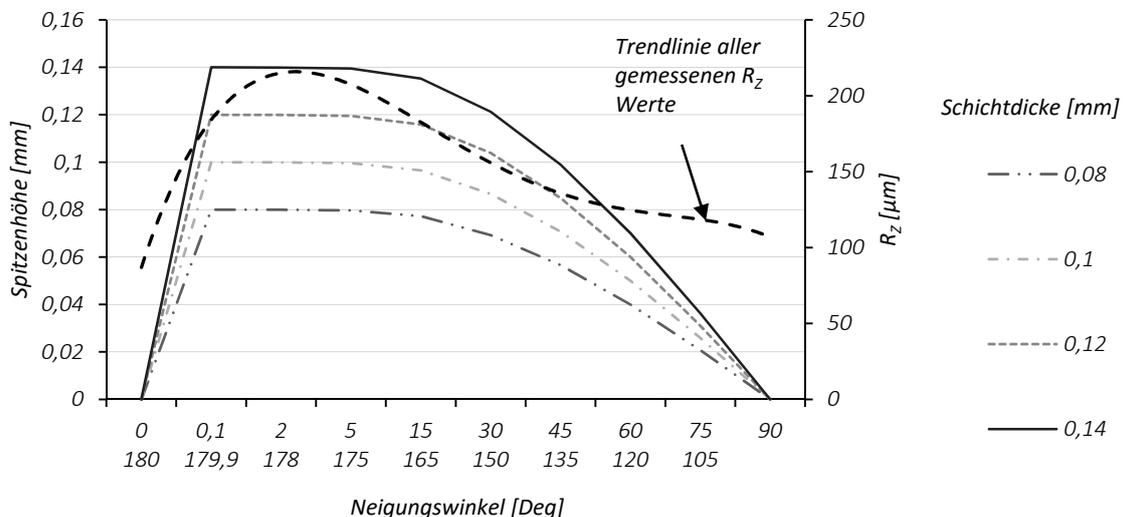


Abb. 5-1: Gegenüberstellung gemessene und berechnete Oberflächengüte [ReMa13]

Ein Anwendungsbeispiel ist die Optimierung der Bauteilorientierung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit für Laser-Strahlschmelzen (Abb. 5-2).

In diesem Beispiel wird der Optimierer so eingestellt, dass die gesamte Bauhöhe, das Volumen erforderlicher SK und die von SK betroffenen Flächen minimiert werden. Für ein beispielhaftes Bauteil erfolgte so die erfolgreiche Fertigung auf Vorschlag des Optimierers. Der Optimierer lieferte das nachvollziehbare Ergebnis, die Baurichtung

nahezu übereinstimmend mit der Rotationsachse zu wählen. Die Abweichung von $0,1^\circ$ liegt vor, da der genetische Algorithmus hier ein Individuum mit ausreichend guter Qualität bestimmt, dies jedoch nicht zwangsläufig die exakt beste Lösung repräsentiert [KöWi15].

Weitere Details zu dem von Danjou beschriebenen Optimierungsalgorithmus können [Da10] entnommen werden. Danjous Dissertation beinhaltet zudem eine ausführliche Beschreibung des Stands von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die automatisierte Bauteilorientierung. Demzufolge erfolgt hier nur eine knappe Zusammenfassung wesentlicher und ergänzender Quellen. Ein umfassender Überblick der bekannten Ansätze bis 2007 kann auch [PaVe07] entnommen werden.

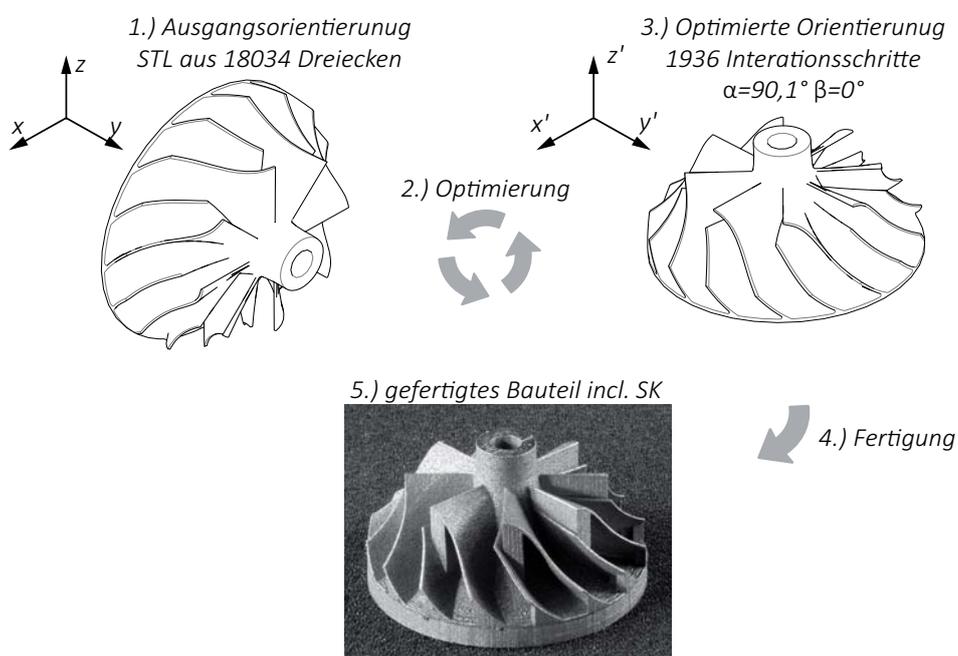


Abb. 5-2: Testfall Wirtschaftlichkeit nach [KöWi15]

Grundlegende Untersuchungen zur STL-basierten Optimierung der Bauteilorientierung sind vor allem von Allen, Dutta et al. veröffentlicht worden [AlAl98], [AlDu94], [AlAl98]. Sie beschreiben, wie die Teilprozesse Schichtzerlegung, Stützkonstruktionen und Bauhöhe in Kombination optimiert werden können, um Stereolithografiebauteile möglichst kosteneffizient herstellen zu können.

Neben diesen Ansätzen existieren bereits auch Lösungen, die zeigen, dass die Optimierung der Bauteilorientierung direkt im CAD-Modell umgesetzt werden kann. So beschrieben Chen et al. einen multikriteriellen Ansatz, der die Lageoptimierung direkt in *PTC Pro/ENGINEER* durchführt. Die Lösung beschränkt sich jedoch auf vergleichsweise einfache Geometrie, bei der ebene Flächen vorhanden sind [ChFu95].

Weitere Untersuchungen beschreiben Ansätze zur Beschleunigung des Optimierungsprozesses, z. B. durch Nutzen von genetischen Algorithmen [PhPa12], [XuLo99].

Aktuelle Ansätze befassen sich immer detaillierter mit der Problemstellung. So werden beispielsweise die Effekte der Orientierung auf die Bauteilgenauigkeit und mechanischen Eigenschaften untersucht [FaSo14], [PaAn11].

5.1.2 Anordnen von Bauteilen für die simultane Fertigung

Kommt es zu einer simultanen Fertigung von mehreren Bauteilen in einem Bauprozess, muss eine möglichst optimale Anordnung dieser erfolgen (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Abgesehen von der Berücksichtigung fertigungstechnischer Einschränkungen, z. B. dem gegenseitigen Wärmeeinfluss oder der Entformbarkeit, handelt es sich hier um eine typische Problemstellung des Operations Research. In diesem Kontext wird unter den Begriffen Anordnungs-, Zuschnitts- und Packungsproblem eine Vielzahl von entsprechenden Problemstellungen zusammengefasst.

In jedem Fall ist es das Ziel, immer eine optimale Nutzung der vorhandenen Ressourcen zu erreichen, z. B. durch die bestmögliche Beladung eines Containers oder besonders materialschonende Zuschnitte. Das Beispiel der Containerbeladung macht bereits deutlich, dass unter Umständen eine Vielzahl von Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Denn neben der möglichst platzsparenden Nutzung des Laderaums muss auch die Gewichtsverteilung beachtet werden. Ebenso müssen weitere Einschränkungen, z. B. im Hinblick auf die Stapelbarkeit der einzelnen zu ladenden Objekte, mit berücksichtigt werden. Im Fall der Materialzuschnitte können z. B. anisotrope Materialeigenschaften eine Rolle bei der Lösungsfindung spielen.

Bereits bestehende Lösungsansätze beziehen häufig nur eine einzige entscheidende Optimierungskomponente mit ein. Hier können zwei verschiedene Problemstellungen differenziert werden [Sc08]:

- *Ermitteln der optimalen Anordnungsvariante:* In diesem Fall sollen in einem gegebenen Bereich in Form und Größe sowie Anzahl vorgegebene, kleinere Objekte platziert werden. Dabei soll die Gesamtbewertung dieser Objekte in dem gegebenen Bereich maximal sein. Ein Beispiel hierfür ist die Anordnung von Blechzuschnitten.
- *Ermitteln der optimalen Kombination von Anordnungsvarianten:* Hier stehen hinreichend viele definierte Bereiche zur Verfügung. Die ebenfalls bekannten kleineren Objekte sollen nun so angeordnet werden, dass die Menge der genutzten Bereiche minimal ist. Ein Beispiel hierfür ist die Beladung von Containern, mit dem Ziel die vorhandene Ladung auf so wenige Container wie möglich zu verteilen.

Je nach Anwendung werden die zu lösenden Probleme in drei Dimensionen gegliedert:

- Bei eindimensionalen Problemen erfolgt die Optimierung nur anhand eines Parameters. Dies ist z. B. beim Stangenzuschnitt der Fall. Problemstellungen dieser

Dimension treten bei AF üblicherweise nicht auf und werden daher nicht weiter betrachtet.

- Bei zweidimensionalen Problemen werden die Anwendungen betrachtet, die in einem ebenen Bereich zu optimieren sind. Dies sind häufig Zuschnittsprobleme, wie die bestmögliche Blechausnutzung beim Brennscheiden. Zweidimensionale Problemstellungen treten auch bei AF auf. So können bei Verfahren mit Stützkonstruktionen die Bauteile i. d. R. nicht übereinander platziert werden und die Optimierung kann auf das Verschachteln von entsprechenden Konturen auf der Bauplatte reduziert werden [CaGi13]. Üblicherweise wird diese Vorgehensweise als Verschachteln (engl. Nesting) beschrieben [Sc08]. In Abb. 5-3 ist ein solches Beispiel dargestellt. Die zuvor orientierten Bauteile werden aus fertigungstechnischen Gründen schräg zur Beschichterrichtung angeordnet [VDI3405-3]. Dazu wird die Maximalkontur der Bauteile auf die Ebene der Bauplatte projiziert. Die Maximalkontur entspricht dem Schattenwurf des Bauteils incl. Stützkonstruktionen bezüglich der Baurichtung. Die so erzeugten Konturen werden dann verschachtelt, wobei Mindestabstände etc. berücksichtigt werden [MaKö11].

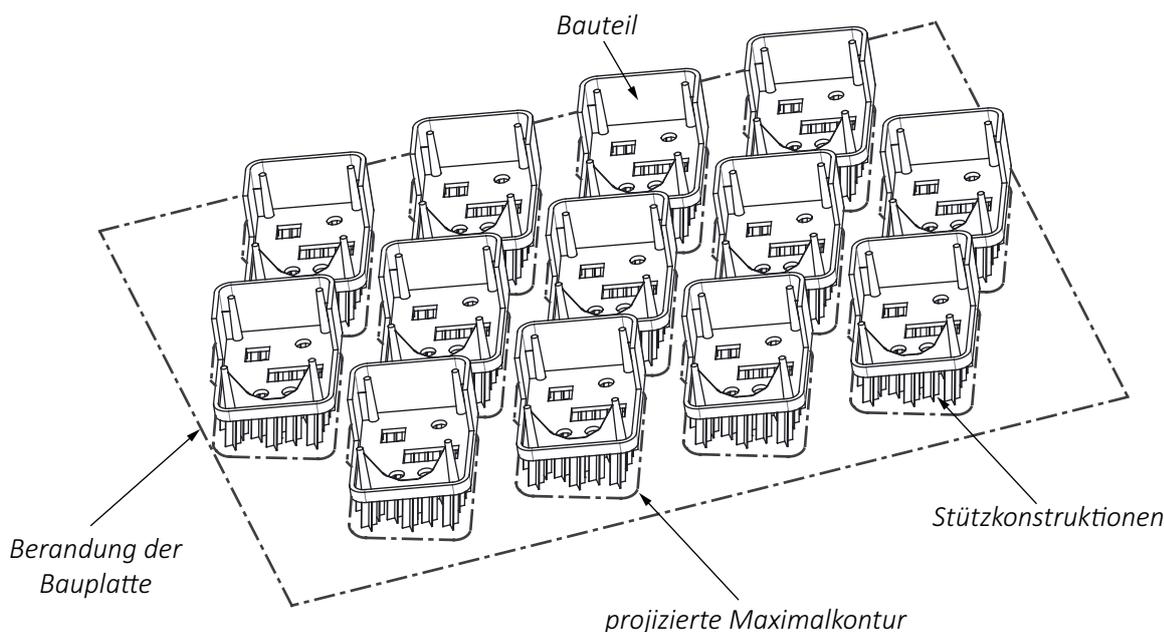


Abb. 5-3: Verschachteln von Laser-Strahlschmelz-Bauteilen

- Unter dreidimensionalen Problemen werden alle Anwendungen zusammengefasst, bei denen ein gegebener Raum mit anderen Objekten zu füllen ist. Dies ist z. B. beim Laser-Sintern der Fall. Hier können die zu fertigenden Bauteile möglichst dicht gepackt werden, sodass der verfügbare Bauraum bestmöglich genutzt wird. Dieser Fall ist in Abb. 5-4 beispielhaft dargestellt. Benannt werden diese Aktionen als Packen (engl. Packing) [Sc08].

Die Bezeichnung der Dimension hängt somit nicht von den in der Realität immer dreidimensionalen Ausgangssituationen ab, sondern von der Anzahl der für die Problembeschreibung und Modellbildung notwendigen Parameter. Theoretisch ist die Erweiterung hin zu einem vierdimensionalen Problem möglich, wenn z. B. ein dreidimensionales Packungsproblem noch um den Parameter Zeit erweitert wird [Dy90].

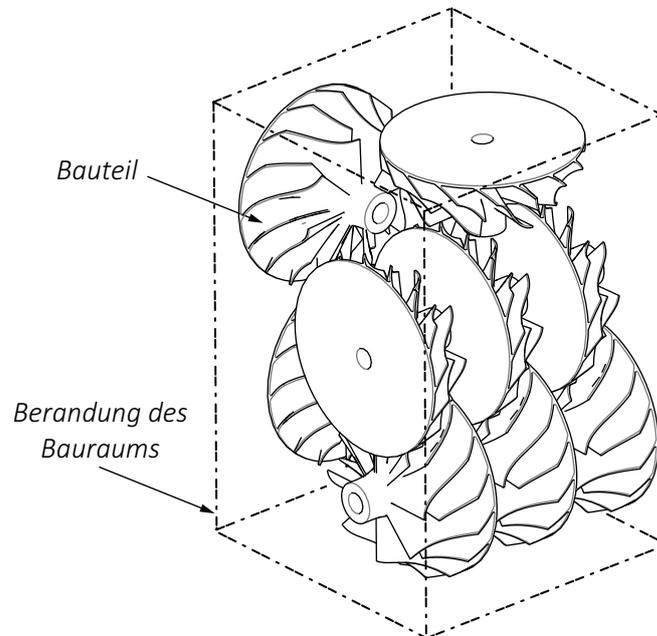


Abb. 5-4: Packen von Laser-Sinter-Bauteilen

Für die Lösung solcher Zuschnitt- und Packungsprobleme existiert eine Vielzahl von Lösungsansätzen. Hier stellen Sweeny und Paternoster eine umfangreiche Bibliografie zur Verfügung, welche einen Großteil der betreffenden Veröffentlichungen bis 1990 enthält [SwPa92]. Bennell und Oliveira fassen in ihrem Tutorial „*The geometry of nesting problems*“ weitere, spezifisch das Nesting betreffende, Ansätze zusammen [BeOl08]. Lösungen für die gängigen Probleme, z. B. den Zuschnitt rechteckiger Teile oder auch die Containerbeladung, können dem Lehrbuch „*Zuschnitt- und Packungsoptimierung*“ von Scheithauer entnommen werden [Sc08].

5.1.2.1 Zweidimensionale Verschachtelungsprobleme

Die Lösung von zweidimensionalen Verpackungsproblemen lässt sich grob in zwei Teilaufgaben zerlegen. Die erste Aufgabe ist die Optimierung der Anordnung der Konturen und die zweite Aufgabe die Prüfung auf Durchdringung einzelner Konturen in der gewählten Anordnung.

Für die Optimierung der Anordnung werden verschiedene Optimierungsverfahren eingesetzt. So nutzen einfache Ansätze iterative Anpassungen der Anordnung, bis ein gewünschtes Optimierungsziel erreicht ist [AlSa80], [BlHa93], [ChFu03]. Eine weitere

Vorgehensweise sind gravitationsbasierte Ansätze, welche die zu verschachtelnden Konturen in die umhüllende Kontur „fallen“ lassen, um so eine möglichst dichte Verschachtelung zu erreichen [LiHe06]. Evolutionäre Algorithmen, z. B. agentenbasierte oder genetische Algorithmen, können ebenfalls genutzt werden [HaSh05], [Ja96]. Besonders bei nichtkonvexen Polygonen können diese hilfreich sein. Hier sind analytische Lösungen oft nur schwer umsetzbar oder resultieren in sehr langen Laufzeiten. Neuere Ansätze nutzen Erkenntnisse aus der Bionik, wie das Verhalten von Ameisen, für die Optimierung [Ya14].

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	=	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1		0	0	0	0	1	3	3	3	3	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1		0	0	1	0	1	3	3	3	3	1
0	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1		0	1	3	0	1	3	3	3	3	1
1	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1		0	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1		1	3	3	3	2	4	4	4	4	2
1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1		0	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1		1	3	3	3	4	6	6	6	6	2
0	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1		0	0	0	0	1	3	3	3	3	1	1		0	1	1	1	2	4	4	6	2	2
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1		0	0	0	0	1	1	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abb. 5-5: Durchdringungsprüfung nach [SeFa86], Bild nach [BeOl08]

Die Durchdringungsprüfung ist die zweite Teilaufgabe bei der Verschachtelung. Auch hierfür sind verschiedene Vorgehensweisen bekannt. Eine einfach nachvollziehbare Lösung ist die Rastermethode. Der Optimierungsbereich wird hier als feines Raster abgebildet, vergleichbar mit einem karierten Blatt [BeOl08], [OlFe93], [RaRa01]. Ein Anwendungsbeispiel ist der Ansatz von Segenreich und Faria. Demzufolge werden die Bereiche der Konturenzüge jeweils mit Einsen, die innenliegenden Bereiche mit Dreien und die leeren Bereiche mit Nullen gekennzeichnet (Abb. 5-5). Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass zwischen Überlappungen und Berührungen unterschieden werden kann. Ist das Ergebnis der Addition der einzelnen Zellen eine Zwei, so liegt eine Berührung vor, bei Werten größer einer Drei eine Überlappung [SeFa86].

Eine weitere Methode ist die Nutzung der „direkten“ Geometrie, d. h. die analytische Prüfung auf Durchdringung durch Berechnung der Schnittpunkte einzelner Kanten (engl. Collision Detection). Vorteil dieser Methode ist das exakte Ergebnis, Nachteil ist die mit steigender Kantenzahl exponentiell steigende Rechendauer [BeOl08]. Darüber hinaus ist es nicht trivial, die relative Lage einzelner Polygone zu bestimmen. Denn es muss auch, wenn keine Durchdringung vorliegt, geprüft werden, ob ein kleines Polygon komplett in einem größeren liegt. Um diesen Vorgang zu beschleunigen, sollte erst eine Prüfung der jeweiligen rechteckigen Boundingboxen (BB) der Polygone und Kanten erfolgen. Nutzt man das BB-Verfahren, haben Ferriera et al. eine Reduktion von 90,7 % bis 97,6 % der notwendigen Tests zur Berechnung der Schnittpunkte dokumentiert [FeAl98]. Die Überprüfung der BB ist im Vergleich zur Ermittlung der

Schnittpunkte einfacher, da lediglich die minimalen und maximalen Koordinaten der betroffenen BB zu prüfen sind.

Zur Lageprüfung können dann Ansätze genutzt werden, welche die Lage eines Punkts in Bezug auf einen Polygonzug ermitteln. Zu nennen ist hier die D-Funktion [Ko81], [La00], [Ma84], [PrSh88]. Eine Erweiterung ist die Phi-Funktion, mit der direkt die Lage zweier Objekte zueinander geprüft werden kann. Es handelt es sich um eine mathematische Gleichung, welche die veränderbare Lage zweier Objekte zueinander beschreibt. Wenn das Ergebnis der Gleichung größer als Null ist, haben die beiden Objekte keinen Kontakt. Ist das Ergebnis gleich Null berühren diese sich. Ein Wert kleiner als Null bedeutet Überlappung. Wird die Gleichung normalisiert, ist das Ergebnis der euklidische Abstand zwischen beiden Objekten [StSc04].

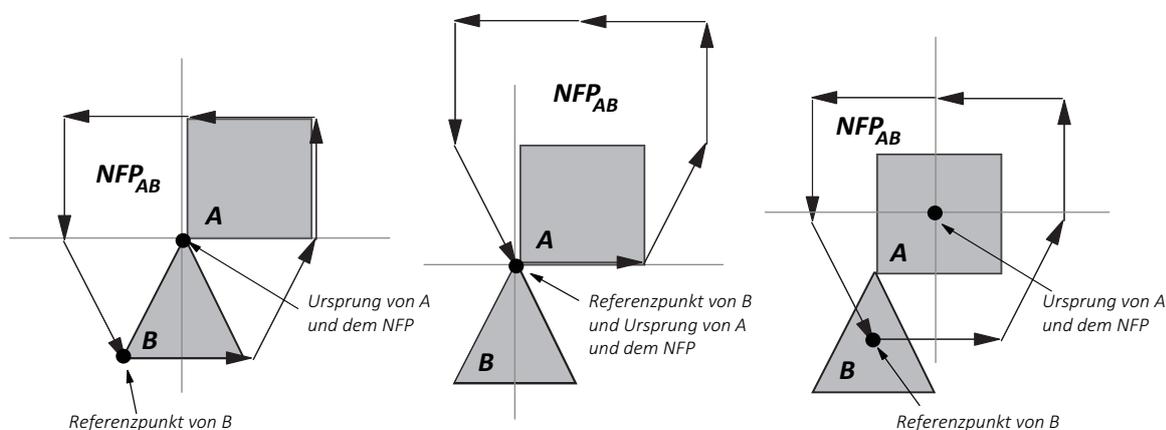


Abb. 5-6: Nofit Polygon nach [BeOl08]

Als weiterer Lösungsansatz für die Durchdringungsprüfung kann das Nofit Polygon (NFP) genutzt werden. Das NFP ist das Ergebnis der Verschiebung eines Polygons B um ein weiteres Polygon A. Es bezeichnet dabei den durch die Verschiebung entstandenen neuen Polygonzug. Dieser kennzeichnet den Bereich, in dem immer eine Überschneidung beider Polygone vorliegt, sobald der Referenzpunkt des Polygons B im NFP liegt (Abb. 5-6).

NFP-basierte Lösungsansätze sind sowohl für konvexe (z. B.: [Cu89], [Gh91]) als auch für nichtkonvexe (z. B.: [CaRi03], [LiHe06]) Polygone bekannt. Ebenfalls existieren Lösungen für die Verschiebung (z. B.: [BuHe07], [Ma84]) und Zerlegung (z. B.: [AgFl02], [WaAm99]) von NFPs. Die Möglichkeit der Anwendung von genetischen Algorithmen zum Nesting unter Nutzung des NFP für AF wurde von Canellidis et al. an dem Beispiel der Stereolithografie nachgewiesen [CaGi13].

5.1.2.2 Dreidimensionale Packungsprobleme

Auch für dreidimensionale Problemstellungen sind Lösungsansätze dokumentiert. Auch wenn stützkonstruktionsbasierte Verfahren mitunter auf eine zweidimensionale Problemstellung reduziert werden können, sind diese Lösungen von Interesse. Fertigungs- und aufgabenbedingt kann auch der Fall auftreten, dass doch SK von einem auf das andere Bauteil zugelassen werden, oder Bauteile ineinanderkragen. In diesen Fällen und allen Verfahren, die ohne SK auskommen, liegt ein dreidimensionales Packungsproblem vor.

Vergleichbar mit den zweidimensionalen Problemstellungen werden auch im dreidimensionalen Fall hüllkörperbasierte Ansätze zur Vereinfachung genutzt. Die dazu erzeugten Boundingboxen ermöglichen eine Beschleunigung der Durchdringungsprüfung. Die entsprechenden Problemstellungen werden als Paletten- oder Container-Beladungsprobleme beschrieben (Abb. 5-7) [Sc08].

Diesbezüglich können drei verschiedene Fälle unterschieden werden. Liegt ein homogenes Problem vor, sind die Abmessungen der Hüllkörper identisch [Da10]. Da additive Fertigungsverfahren derzeit weniger für Serienteile mit identischen Abmessungen eingesetzt werden, ist dies noch eine seltene Variante.

Sind die Abmessungen der Hüllkörper verschieden, spricht man von einem schwach-heterogenen Problem oder einem stark-heterogenen Problem. Diese werden hinsichtlich der Anzahl verschiedener Abmessungen unterschieden. Ist diese eher gering (zwei bis acht Varianten) wird ein schwach-heterogenes Problem klassifiziert. Bei höherer Diversität liegt ein stark-heterogenes Problem vor [Da10]. Da AF eher in der Einzelfertigung eingesetzt wird, ist eine heterogene Problemstellung wahrscheinlich.

Das Beispiel in Abb. 5-7 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise eines Lösungsansatzes für das Paletten-Beladungsproblem. Abhängig von Abmessungen und Gewicht werden die Objekte schichtweise gepackt [Sc08]. Diese Vorgehensweise ist auch für AF sinnvoll, da ein globales Optimierungsziel immer die Reduzierung der gesamten erforderlichen Schichten ist. Richtungsabhängige Lösungen sind somit zu bevorzugen.

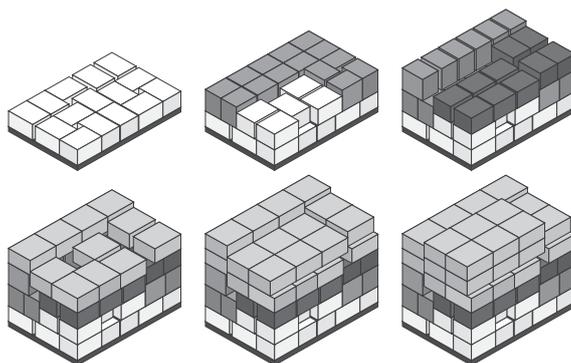


Abb. 5-7: Paletten-Beladungsproblem (Bild: [Sc08])

Als Packungsalgorithmus wird häufig ein Bottom-Left-Algorithmus eingesetzt. Hier werden die Objekte ausgehend von der unteren linken Ecke gepackt. Bottom-Left-Algorithmen für Packungs- und Verschachtelungsprobleme sind umfassend untersucht und werden laufend optimiert [BuHe06], [HuYe11], [Jy10]. Problematisch für die Verwendung im Rahmen von AF ist jedoch die bestimmende Eigenschaft, den Optimierungsbereich von unten links beginnend zu füllen. Üblicherweise werden bei AF die Bauteile jedoch mittig auf der Bauplatte positioniert [MaKö11]. Dennoch findet dieser Ansatz z. B. bei Hur et al. Verwendung. In Verbindung mit einem genetischen Algorithmus werden Bauteile gepackt. Eine 3D-Voxel¹⁴-Repräsentation der Bauteile ermöglicht eine im Vergleich zu Boundingboxen verbesserte Durchdringungsprüfung [HuCh01].

Erste Lösungen zum AF-spezifischen Packen wurden 1997 von Ikonen et al. veröffentlicht. Auf STL-Daten basierend wird so ein Ansatz vorgestellt, der beschreibt, wie auch nichtkonvexe Bauteile ineinander gepackt werden können. Dazu wird eine schrittweise Vorgehensweise genutzt. Zuerst wird geprüft, ob sich die BB der einzelnen Bauteile durchdringen. Ist das nicht der Fall, werden die BB der einzelnen Dreiecke der jeweiligen STL-Dateien geprüft. Letztlich kommt es ggf. zu einer Prüfung einzelner Dreiecke auf Durchdringung. Der Vorteil hieran ist, dass die vorgeschalteten Durchdringungsprüfungen der einzelnen BB weniger aufwendig sind [IkBi97].

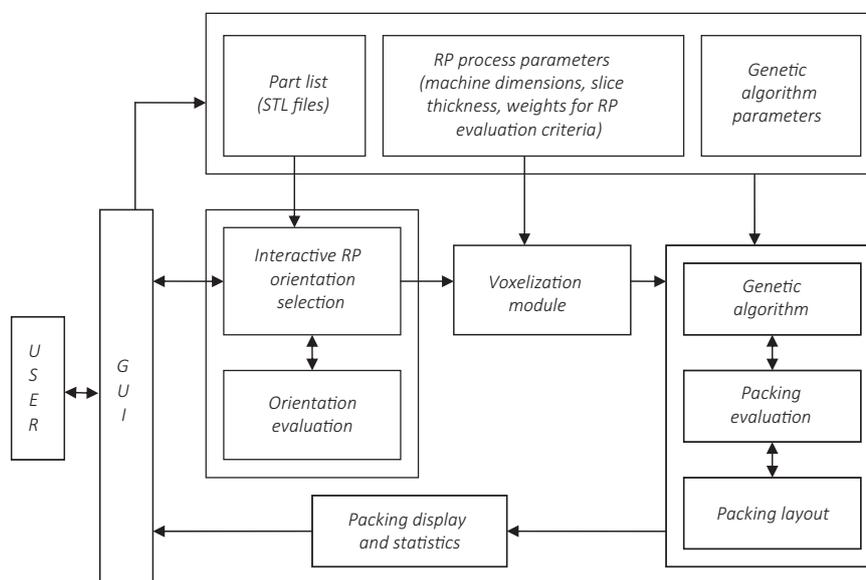


Abb. 5-8 Softwarearchitektur des Optimierers nach [GoPa08]

Gogate und Pande beschreiben eine vergleichbare Lösung, die unter Verwendung eines genetischen Algorithmus ebenfalls eine möglichst dichte Packung vorgegebener STLs erreichen soll. Hier wird wiederum das Voxelmodell genutzt, um die Durchdrin-

¹⁴ Der Begriff Voxel (Komposition aus VOlumetric und piXEL) bezeichnet einen Gitterpunkt in einem dreidimensionalen Gitter.

gungsprüfung durchzuführen. Für die Lösung wird eine eigene Software beschrieben, die nach dem in Abb. 5-8 gezeigten Schema genutzt wird [GoPa08].

Ein wesentliches Problem bei allen Ansätzen zur Bauraumoptimierung für AF bleibt der Konflikt zwischen Bauteilorientierung- und Anordnung. Aus fertigungstechnischer Sicht ist es nicht immer zielführend, das Bauteil beliebig zu orientieren, um so eine möglichst dichte Packung zu erreichen. Hier beschreibt Danjou, wie eine vorhergehende Optimierung der Bauteilorientierung mit der Optimierung der Bauraumnutzung verknüpft werden kann. Ausgehend von zuvor bestimmten Orientierungen wird im Anschluss das Packen der Bauteile vorgenommen, wobei die Anzahl der Freiheitsgrade auf die Rotation um die Z-Achse und die Translation in alle Raumrichtungen beschränkt wird. Ein genetischer Algorithmus in Verbindung mit den erforderlichen Durchdringungsprüfungen ermittelt dann eine möglichst dichte Anordnung [Da10].

5.1.2.3 Softwarelösungen für das Verschachteln und Packen

Rechnergestütztes Packen und Verschachteln für Anwendungen, wie Laser-Sintern oder Laser-Strahlschmelzen, wird von unterschiedlichen Software-Lösungen unterstützt. Dabei werden üblicherweise die STL-Daten der Geometrie verwendet. Verbreitete Softwarelösungen sind beispielsweise *Materialise Magics Sintermodule* [Ma15f] oder *netfabb Automatic Packing* [Ne14], [Ne15a] (Abb. 5-9). Die Anwendungen sind dazu in der Lage, 3D-Objekte dicht im Bauraum zu packen. Dabei werden auch Entformbarkeit und Hinterschneidungen berücksichtigt. *Materialise* erlaubt hier, die Bauteilorientierung benutzerdefiniert einzustellen oder eine freie Anpassung durch den Optimierer.

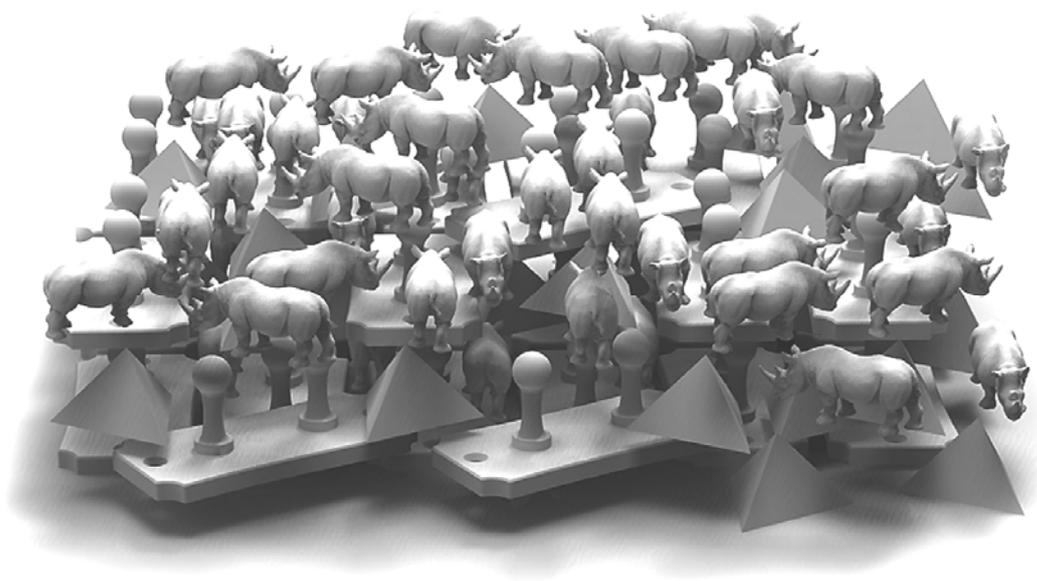


Abb. 5-9: netfabb Automatic Packing (Bild: [Ne15a])

Daneben existieren verschiedene, spezialisierte Softwarelösungen. Diese sind anwendungsfallsspezifisch nutzbar. Eine gängige Anwendung ist die Herstellung von Zahnersatz mittels Laser-Strahlschmelzen [EOS15]. Anwendungen, wie *Phenix Systems Phenix Dental* [Ph15], unterstützen hier die Optimierung der Bauteilanordnung auf der Bauplatte.

Aktuelle Entwicklungen sind die als Add-In programmierte Werkzeuge für gängige 3D-CAD-Systeme. So ist *3DPrintTech* eine für *Autodesk Inventor* oder *Dassault Systemes SolidWorks* entwickelte Erweiterung für das 3D-Drucken. Diese ermöglicht die einfache Zerlegung größerer Bauteile mit gleichzeitiger Erzeugung von formschlüssigen Fügestellen und anschließendem Packen im Bauraum. So können auf einfache Art Objekte hergestellt werden, die größer als der Bauraum ausfallen [Kr14].

Weitere Softwareanwendungen aus anderen Bereichen der Produktion stellen ebenfalls Lösungen zur Verfügung, die durch kleinere Anpassungen auch für AF nutzbar wären. So ist die Software *Fraunhofer PackAssistant* dazu entwickelt worden, Bauteile in Gitterboxen bestmöglich zu packen. Eine Anwendung im Bereich AF ist denkbar. *PackAssistant* verarbeitet neben STL- auch VRML-, STEP- und JT-Dateien [Fr15].

Ebenfalls sind Lösungen für das Verschachteln von Zuschnitten, z. B. für Blech- oder Textilizuschnitte, erhältlich. So bietet z. B. *Alma* bereits seit 1979 Software in diesem Bereich an. Das aktuelle Produkt *Alma PowerNest* optimiert Tafelzuschnitte für verschiedene Anwendungen. *PowerNest* kann in unterschiedlichen CAD-CAM-Umgebungen implementiert werden [Al15].

5.1.3 Auswahl der Lösungsansätze zur Orientierung und Verschachtelung

Für die computergestützte Lösung der Teilprobleme Bauteilorientierung und -Anordnung existieren, wie dargestellt, viele unterschiedliche Ansätze. Nur wenige der in der Literatur dokumentierten Lösungen legen für eine Optimierung jedoch das native CAD-Modell zugrunde, bzw. führen die erforderlichen Schritte direkt in der CAD-Umgebung durch. Diese Ansätze sind dann auch unzureichend ausgestaltet. Funktionsfähige oder bereits kommerziell erhältliche Lösungen beschränken sich auf die STL-basierte Optimierung. Die hierzu beschriebenen Lösungen sind als derart leistungsfähig einzustufen, dass im Bereich der STL-basierten Optimierung an dieser Stelle keine Notwendigkeit für weitergehende Untersuchungen erkannt wird. Angestrebt wird daher die direkte Integration der funktionierenden Lösungsansätze in die CAD-Umgebung.

Für die Optimierung der Bauteilorientierung wird in dieser Arbeit der Ansatz von Danjou zur Implementierung ausgewählt. In Verbindung mit den von Allen,

Dutta et al. beschriebenen Grundlagen und der von Chen et al. gezeigten CAD-Integration sind die für eine Integration erforderlichen Algorithmen und Methoden ausreichend beschrieben.

Die für die Optimierung der Bauteilanordnung beschriebenen Algorithmen sind ebenfalls als so leistungsfähig einzustufen, dass hier eine bedarfsgerechte Umsetzung erfolgen kann. Durch Anpassung von Bottom-Left-Algorithmen hin zu einer fertigungsgerechten Lösung kann hier eine Implementierung der Ansätze, z. B. von Hur et al., erfolgen. Hierbei werden die Erkenntnisse zur Nutzung von BB-bezogenen Durchdringungsprüfungen nach Ikonen et al. integriert. Ebenfalls werden die NFP-Algorithmen als nutzbare Lösung zur Durchdringungsprüfung von Polygonen betrachtet.

Da die vorhandene Software ebenfalls leistungsfähige Packungsalgorithmen zur Verfügung stellt, wird auch eine Integration oder Kopplung dieser Softwarelösung in die Gesamtlösung untersucht.

5.2 Generierung von Stützkonstruktionen

Die Generierung von Stützkonstruktionen ist ein wesentlicher Pre-Prozessschritt für viele additive Fertigungsverfahren (vgl. 2.2.1.2). Verschiedene Lösungsansätze und bereits erhältliche Softwarelösungen stellen Methoden zur Erzeugung von SK zur Verfügung. Grundlegendes wurde bereits zu Beginn dieser Arbeit in Abschnitt 2.2.1.2 erläutert.

5.2.1 Ansätze zum Generieren von SK

Neben den Ansätzen, die sich im Bereich der Optimierung der Bauteilorientierung mit Stützkonstruktionen befassen (vgl. Abschnitt 5.1.1 und [Da10]) sind weitere Lösungen für die Erzeugung von Stützkonstruktionen bekannt. Auch wenn heute umfassende Softwarelösungen zur Erzeugung von Stützkonstruktionen verfügbar sind (vgl. Abschnitt 5.2.2), werden die grundlegenden Veröffentlichungen an dieser Stelle kurz zusammengefasst.

Die Problemstellung lässt sich hier wie folgt beschreiben: für ein gegebenes Objekt in einer definierten Bauteilorientierung soll die (minimale) Anzahl von Stützkonstruktionen gefunden werden, die zur Herstellung des Bauteils benötigt wird [KuMa00].

5.2.1.1 Stützkonstruktionen facettenbasiert erzeugen

Einen grundlegenden Ansatz zur Lösung dieses Problems haben Allen und Dutta veröffentlicht [AlDu95]. Ausgehend von dem CAD Modell des Bauteils und

vorgegebenen Orientierungen ermitteln sie die benötigten SK für jede dieser Orientierungen. Dazu gehen sie in drei Schritten vor. Sie bringen das Bauteil in eine der vorgegebenen Orientierungen, dann werden Punkte auf der Oberfläche danach klassifiziert, ob diese Stützkonstruktionen benötigen oder nicht. Im dritten Schritt werden die Stützkonstruktionen berechnet. Zunächst wird das Bauteil trianguliert. Dann werden die Eckpunkte der Dreiecke als Typ-S- und Typ-U-Punkt klassifiziert, wobei die Typ-S-Punkte einen nach außen gerichteten Normalenvektor mit negativer Z-Komponente aufweisen, bei Typ-U-Punkten ist dies nicht der Fall. Folgend werden die Typ-S-Punkte noch in SSC-Punkte, welche Stützkonstruktionen benötigen und NON-SSC-Punkte, welche diese nicht benötigen, klassifiziert. Stützkonstruktionen werden dann benötigt, wenn während des schichtweisen Erzeugens des Objekts freischwebende Abschnitte vorhanden sind oder zu große Überhänge gestützt werden müssen.

Anschließend wird die X-Y-Ebene der Bauplatte in ein Raster eingeteilt. Die Abmessungen des Rasters entsprechen den jeweils maximalen X- und Y-Ausdehnungen der Bounding Box des Bauteils. Der Wert für die Unterteilung des Rasters ist benutzerdefiniert. Die Schnittpunkte der Rasterlinien werden dann durch das Bauteil hindurch nach oben projiziert. Die sich so ergebenden Schnittpunkte mit dem Bauteil werden nochmals danach klassifiziert, ob sie SK benötigen oder nicht. Liegt einer dieser Punkte auf einer Facette, die keine negative Z-Komponente im Normalenvektor aufweist, wird keine Stützkonstruktion benötigt. Ist der Normalenvektor der geschnittenen Facette aber um einen Winkel gegenüber der negativen Z-Achse geneigt, der kleiner als ein vom Benutzer spezifizierter Grenzwert ist, werden SK benötigt. Wenn die projizierten Linien aus dem Raster Facetten schneiden, deren Punkte schon vorher als SSC-Punkte klassifiziert wurden, werden hier ebenfalls SK vorgesehen. Abschließend werden SK ausgehend von den Punkten des Grundrasters auf der Bauplatzform erzeugt. Allen und Dutta verwenden hier einfache Zylinder als Beispiel.

Yang et al. gehen bei der Erzeugung von Stützkonstruktionen ähnlich wie [AlDu95] in drei Schritten vor [YaCh02]. Im ersten Schritt werden diejenigen Flächen ermittelt, die Stützkonstruktionen benötigen. Im zweiten Schritt wird die Kontaktfläche zwischen Stützkonstruktionen und zu unterstützender Fläche bestimmt. In dem darauffolgenden Schritt erfolgt schließlich die Erzeugung der Stützkonstruktionen:

- *Ermittlung der zu stützenden Flächen:* Es werden alle Facetten der STL Datei daraufhin überprüft, ob ihr Normalenvektor eine Komponente in negative Baurichtung aufweist. Diese so ermittelten Dreiecke werden dann gruppiert. Benachbarte Dreiecke, die jeweils eine potenziell zu unterstützende Oberfläche repräsentieren, werden zusammengefasst.
- *Kontaktfläche bestimmen:* Wurden die zu stützenden Flächen ermittelt, muss für jede dieser Flächen die Position der Stützkonstruktionen ermittelt werden. Je nach

Typ der zu unterstützenden Fläche wird anders vorgegangen. Eine Insel benötigt immer Stützkonstruktionen. Die Klassifizierung erfolgt in vier Kategorien (vergleichbar mit Abb. 2-5).

- *Stützkonstruktionen erzeugen*: Schlussendlich wird die endgültige Form der Stützkonstruktionen ermittelt. Dazu werden die zuvor definierten Bereiche, die SK benötigen, auf darunter liegende Flächen oder die Bauplatzform projiziert. Durch Musterfunktionen etc. werden diese Bereiche dann mit der benötigten Geometrie der Stützkonstruktionen gefüllt.

Weitere, vergleichbare Ansätze zur facettenbasierten Erzeugung von Stützkonstruktionen sind z. B. von Kirschman et al. [KiJa91], Webb et al. [WeVe94] oder Swaelens et al. [SwPa95] bekannt. Auch der im folgenden Abschnitt beschriebene Ansatz zur Minimierung von Stützkonstruktionen und eingeschlossenem Volumen ist vom Prinzip her eine facettenbasierte Vorgehensweise.

5.2.1.2 Minimierung von Stützkonstruktionen und eingeschlossenem Volumen

In Bezug auf die Minimierung der Kontaktfläche von Bauteil und Stützkonstruktionen sowie zur Vermeidung von eingeschlossenem Volumen wurde von Majhi et al. ein Ansatz entwickelt, der die erforderlichen Stützkonstruktionen beschreibt [MaJa99].

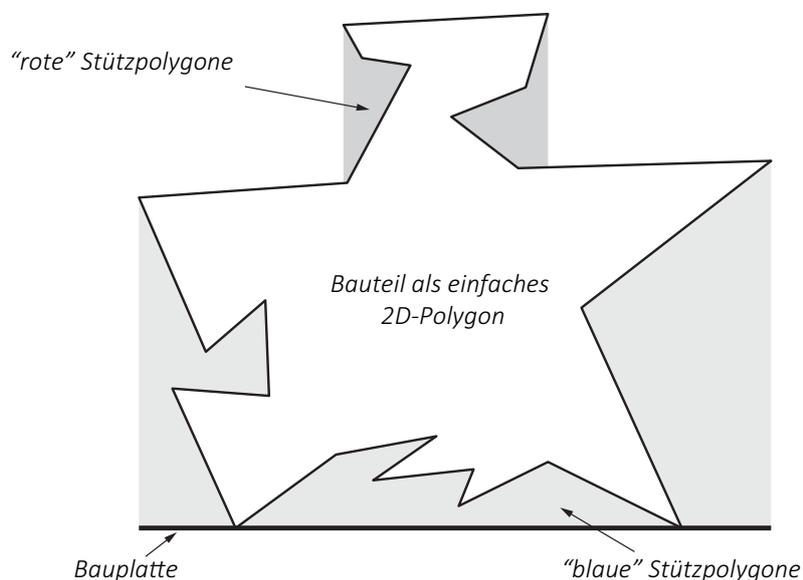


Abb. 5-10: Stützpolygone nach [MaJa99]

Das Problem wird hier zuerst für einfache zweidimensionale Polygone gelöst. Der Algorithmus berechnet alle Kanten mit einem negativen Normalenvektor und projiziert diese auf die Ebene der Bauplatzfläche. In diesem Rahmen unterscheiden die Verfasser „blaue“ und „rote“ Stützpolygone, für deren Berechnung sie je einen eigenen Algo-

rithmus entwickelten. Bei den „blauen“ Stützpolygonen handelt es sich um solche, die eine Kante auf der Plattform haben. Die „roten“ Polygone haben entsprechend keine Kante auf der Plattform, sondern beschreiben ein vom Bauteil (teilweise) eingeschlossenes Volumen. Aus den so ermittelten Stützpolygonen lässt sich eine Funktion herleiten, welche die benötigten Stützkonstruktionen angibt. Die so entstehende Funktion zu minimieren wird als nicht trivial beschrieben.

Im Rahmen der Dissertation von Schwerdt [Sc01] wird weiter auf dieses Problem eingegangen. Die für dreidimensionale Körper entwickelte Funktion zur Minimierung der Stützpolygone kann jedoch aufgrund ihrer Komplexität nicht gelöst werden. Schwerdt entwickelt auch einen Algorithmus, der ausgewählte Flächen vor der Berührung mit Stützen schützt. Dazu werden alle Orientierungen ermittelt, für die eine Fläche des Bauteils nicht in Berührung mit Stützen ist. Ein darauf basierender Algorithmus ermittelt das Maximum der Summe aller Dreiecksflächen, die nicht in Berührung mit Stützen sind. Es wird somit eine Beschreibung aller Baurichtungen berechnet, für diejenigen die Summe aller Flächen, welche die nicht in Berührung mit Stützen sind, maximal ist. Die damit verbundene Vorgehensweise zur Ermittlung der von Stützkonstruktionen betroffenen Flächen wird auch in [IlJa07] beschrieben.

5.2.1.3 Featurebasierte Erzeugung von Stützkonstruktionen

Otto et al. wählen für die Erzeugung von Stützkonstruktionen einen featurebasierten¹⁵ Ansatz [OtKi95]. Als Feature für Stützkonstruktionen werden Raster und entlang eines Pfads gemusterte Stützpfiler vorgeschlagen. Wird das Raster featurebasiert definiert, dienen die Parameter Höhe, Wandstärke, Länge, Breite sowie die Größe der Zwischenräume zur Steuerung. Die Abmessungen des Rasters orientieren sich hierbei an den Oberflächen des Bauteils, die später in Kontakt mit den Stützkonstruktionen sind. Wird kein komplettes Raster benötigt, dienen Stützpfiler in der Form von Kegelstümpfen als Stützen. Diese Geometrie wird genutzt, um eine möglichst stabile Anbindung an die Bauplatte mit dem einfachen Entfernen des Bauteils zu kombinieren. Die Kegelstümpfe werden z. B. entlang eines Pfads gemustert.

5.2.1.4 Substitution von Stützkonstruktionen durch optimierte Gestaltung

Ebenfalls von Allen und Dutta wurde 1997 ein Ansatz diskutiert, mit dessen Hilfe komplett auf Stützkonstruktionen verzichtet werden kann [AlDu97]. Diese Vorgehensweise soll zu einer Verringerung von Bauzeit und Material führen. Grundidee ist

¹⁵ Als Feature versteht man in einem CAD System die Verwendung von elementaren Komponenten, die dem Nutzer zur Modellierung bereitgestellt werden, z. B. Bohrungen, Fasen oder Nuten.

das Aufdicken von Wänden bei hohlen Objekten, bei denen die genaue Abbildung der inneren Struktur als unwichtig erachtet wird. Bei der Nutzung von Stützkonstruktionen im herkömmlichen Sinne nimmt besonders die manuelle Entfernung und das Nachbearbeiten der beschädigten Oberflächen viel Zeit in Anspruch. Auch wenn es mittlerweile Prozesse gibt, bei denen Bauteil und Stützkonstruktionen aus verschiedenem Material gefertigt werden, stellt das Entfernen aus Bereichen, die ohne Änderungen an der Bauteilgeometrie nicht zugänglich sind (eingeschlossenes Volumen), generell ein Problem dar.

Ein selektives Aufdicken der Objektwände soll hier dazu führen, dass bei hohlen Bauteilen im Inneren auf Stützkonstruktionen verzichtet werden kann (Abb. 5-11). Noch bessere Ergebnisse versprechen sich die Verfasser bei einer Verbindung dieser Vorgehensweise mit variablen Schichtdicken. Da im Rahmen dieser Arbeit der Fokus auf dem Laser-Strahlschmelz-Prozess liegt, wird diese Vorgehensweise nicht weiter im Detail betrachtet. Verfahrensbedingt sind beim Laser-Strahlschmelzen Stützkonstruktionen nicht nur aus geometrischen Gründen, sondern z. B. auch zur Wärmeabfuhr erforderlich. Daher können diese nicht umfassend durch Umgestaltung der Bauteile substituiert werden.



Abb. 5-11: Gestaltoptimierung nach [AlDu97]

5.2.1.5 Optimierte Gestaltung von Stützkonstruktionen

Neben der reinen Ermittlung auf Notwendigkeit und Ort der Stützkonstruktionen wurde in den vergangenen Jahren das Forschungsfeld vor allem dahingehend erweitert, durch optimierte Gestaltung der Stützkonstruktionen deren Funktion zu verbessern und die Menge an notwendigen Stützkonstruktionen zu reduzieren. Ein Beispiel hierfür sind baumartige Stützkonstruktionen, die im folgenden Abschnitt 5.2.2 näher erläutert werden.

Strano et al. veröffentlichten 2013 einen Ansatz, der mathematische Funktionen beschreibt, die zur Generierung der Stützkonstruktionsgeometrie genutzt werden können [StHa13]. Somit ist es möglich, auch komplexe Strukturen schnell zu erzeugen. Die Ergebnisse werden als STL-Datei gespeichert und können dann verarbeitet wer-

den. So können z. B. zelluläre Strukturen als Stützkonstruktionen erzeugt werden. Die Strukturen werden dabei durch implizite Funktionen generiert (Abb. 5-12).

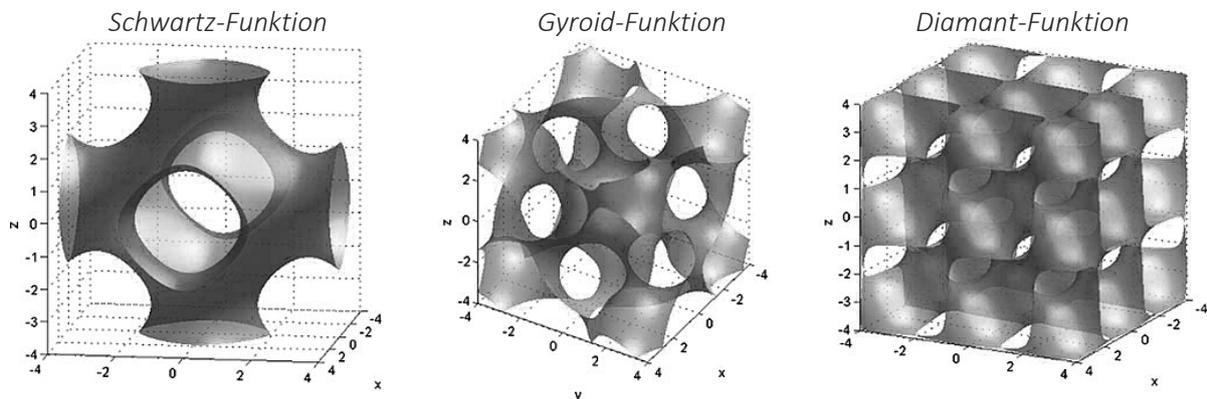


Abb. 5-12: Funktionen zur Beschreibung von Stützkonstruktionen (Bild: [StHa13])

Zur Beschreibung der Oberflächen der Stützkonstruktionen werden die, von Strano et al. als Schwartz- sowie als Gyroid- und Diamant-Funktion beschriebenen, impliziten Funktionen genutzt:

$$\cos x + \cos y + \cos z = 0 \quad (5.1)$$

(Schwartz-Funktion)

$$\cos x \sin y + \cos y \sin z + \cos z \sin x = 0 \quad (5.2)$$

(Gyroid-Funktion)

$$\begin{aligned} \sin x \sin y \sin z + \sin x \cos y \cos z \\ + \cos x \sin y \cos z + \cos x \cos y \sin z = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

(Diamant-Funktion)

Das Ergebnis ist in der Hinsicht vielversprechend, dass die so erzeugten Stützkonstruktionen auf einer Laser-Strahlschmelzanlage (EOS M270) erfolgreich aufgebaut werden konnten. Die Nutzung der Funktionen ermöglicht vor allem eine einfache mathematische Beschreibung der erforderlichen Stützkonstruktionsgeometrie. Diese können durch Triangulierung einfach in das STL-Datenformat überführt und somit nach heutigem Stand der Technik gefertigt werden.

Eine andere Methode für das FDM-Verfahren wurde 2014 von Dumas et al. veröffentlicht [DuHe14]. Der veröffentlichte Ansatz beschreibt, wie gerüstartige Stützkonstruktionen generiert werden können. Inspiriert von Brücken- und anderen Fachwerkbauwerken wird so eine Methode entwickelt, durch die herkömmliche Stützkonstruktionen beim FDM-Verfahren optimiert werden können. Vorteil ist z. B., dass diese umgestalteten Strukturen in das Bauteil kragen können und so nicht von einer auf die andere Bauteilfläche generiert werden müssen. So werden die Strukturen aus

Pfeilern und waagerechten sowie senkrechten Konnektoren zusammengesetzt (Abb. 5-13).

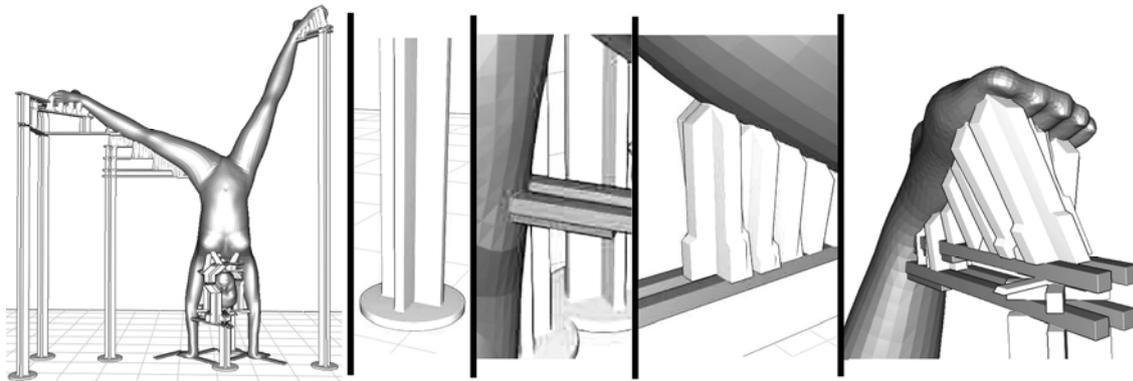


Abb. 5-13: Gerüstartige Stützkonstruktionen (Bild: [DuHe14])

5.2.2 Softwarelösungen zum Generieren von Stützkonstruktionen

Additive Verfahren, wie das Laser-Strahlschmelzen, funktionieren ohne SK nicht. Demzufolge werden seit der Markteinführung entsprechender Anlagen auch Softwarelösungen für die Erzeugung von SK mit angeboten. Deren Leistungsfähigkeit wurde, zusammen mit den Anlagen, kontinuierlich weiterentwickelt. Als Marktführer in diesem Bereich bietet die Firma *Materialise* mit dem *Magics SG Module* [Ma15e], dem *Magics SG+ Module* [Ma15a], dem *Magics Tree Support Module* [Ma15d] und der *AutoFab Suite* [Ma15b] umfassende Werkzeuge für die Erzeugung von Stützkonstruktionen an. Die Werkzeuge sind im Wesentlichen STL-basiert und in die jeweiligen prozessvorbereitenden Softwarelösungen von *Materialise* eingebettet. Die Abb. 5-14 zeigt ein Laser-Strahlschmelzbauteil, dessen baumartige SK mit dem *Magics Tree Support Module* generiert worden sind.



Abb. 5-14: Bauteil mit baumartigen SK (Bild: [Di13], Materialise)

Neben den Lösungen von *Materialise* stellt auch *netfab* mit *netfab Professional 6.0* [Ne15] eine anlagenunabhängige Lösung zur Verfügung. Darüber hinaus existieren „einfachere“ Lösungen für das 3D-Drucken. Zu nennen ist z. B. *Simplify3D* [Si14] oder *Adobe Photoshop CC* [Ad14] (Abb. 5-15). Als anlagenabhängige Lösungen sind z. B. die Anwendungen *3D Printing Systems Kevvox K-Studio* [3D14] oder *Stratasys Object Studio* [Lt13] verfügbar.

5.2.3 Auswahl der Lösungsansätze zur Erzeugung von Stützkonstruktionen

Zusammenfassend kann für die Teilaufgabe der Stützkonstruktionserzeugung festgehalten werden, dass die wissenschaftlich dokumentierten und kommerziell verfügbaren Lösungen bereits sehr umfassend gestaltet sind und dementsprechend nutzbare Ergebnisse liefern. Dennoch ist bisher auch hier die Integration der Erzeugung von Stützkonstruktionen in der CAD-Umgebung nicht kommerziell erfolgt. Dies gilt nicht nur für die Erzeugung selber, auch Analysewerkzeuge die diesbezüglich bei der CAD-Modellierung unterstützen können, sind nicht bekannt. Die Erzeugung erfolgt derzeit basierend auf dem de facto Industriestandard STL als nachgeschalteter Prozessschritt. Neue Ansätze integrieren hier Erkenntnisse aus der Bionik etc. Eine Weiterentwicklung der vorhandenen Lösungen hin zu ressourcenschonenderen Stützkonstruktionen ist das Ziel derzeitiger Entwicklungen. Darüber hinaus sind entsprechende Lösungen bereits in verbreiteten Softwarewerkzeugen, wie *Adobe Photoshop CC*, integriert. Diesbezüglich sollte die entwickelte Lösung eine Kopplung mit den vorhandenen Softwarelösungen zur Erzeugung von Stützkonstruktionen aufweisen.

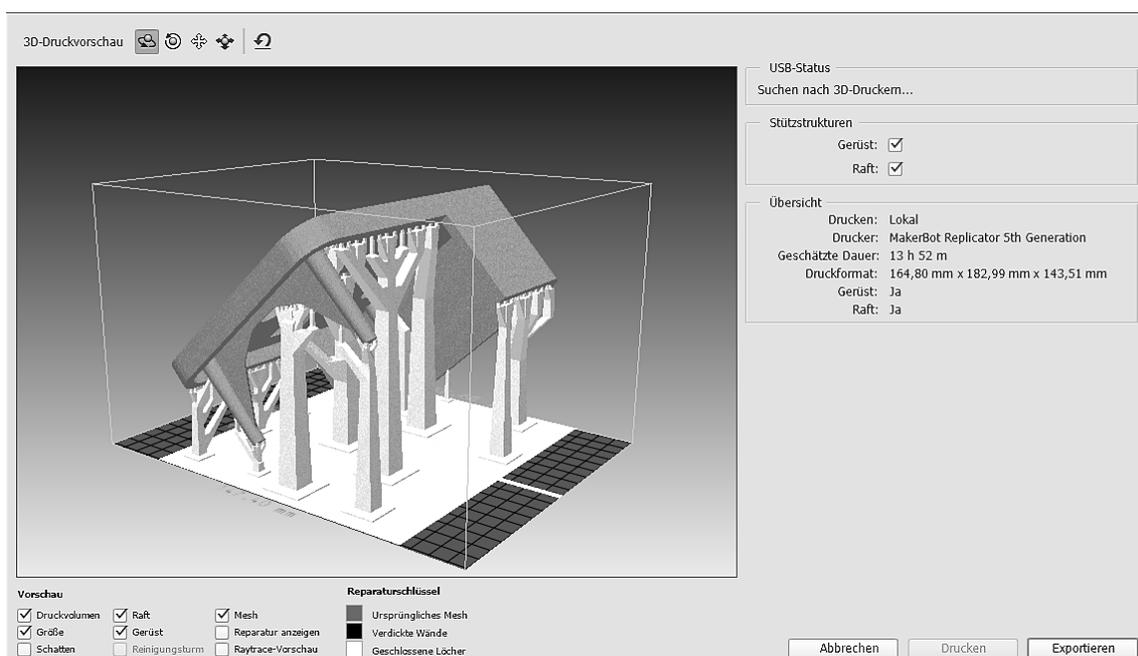


Abb. 5-15: Stützkonstruktionen für das 3D-Drucken mit *Adobe Photoshop CC*

Die wissenschaftlich dokumentierten Ansätze bieten zum einen Integrationspotenzial bei der optimierten Gestaltung von Bauteilen. So werden die Ansätze von Allen und Dutta zur Minimierung von Stützkonstruktionen in die Gesamtlösung integriert. Zum anderen sind aufgrund der vorgesehenen CAD-Integration die Ansätze zur feature-basierten Erzeugung von Stützkonstruktionen nach Otto et al. eine Grundlage für die geplante Lösung. Da es absehbar ist, dass die Geometrie der einzelnen Stützkonstruktionen in einer Datenbank o. ä. beschrieben werden muss, sind auch die von Strano et. al. beschriebenen Methoden nutzbar, die erläuterten mathematischen Funktionen bieten eine gute Möglichkeit zur textbasierten Beschreibung von komplexer Geometrie.

5.3 Generierung von Schichtdaten

Die Generierung von Schichtdaten ist der Pre-Prozessschritt, der die AF ausmacht. Ohne Schichtdaten ist keine schichtweise Fertigung möglich (vgl. Abschnitt 2.2.1.4). Aus diesem Grund sind für die Erzeugung von Schichtdaten viele unterschiedliche Ansätze bekannt. Dabei können die Prinzipien zur Schichtdatengenerierung unterschiedlich klassifiziert werden.

So wird die direkte Schichtzerlegung von der indirekten Schichtzerlegung unterschieden. Die direkte Schichtzerlegung basiert auf den nativen CAD-Daten, d. h., das CAD-Modell wird in seiner im CAD-System beschriebenen Form direkt in ein Schichtdatenformat überführt. Die indirekte Schichtzerlegung basiert hingegen auf zuvor exportierten Daten, welche das Bauteil in triangulierter Form beschreiben. Da es sich hierbei um den Normalfall handelt, wird auf das „indirekt“ als Zusatz verzichtet. Die Abb. 5-16 zeigt beide Fälle als Vergleich.

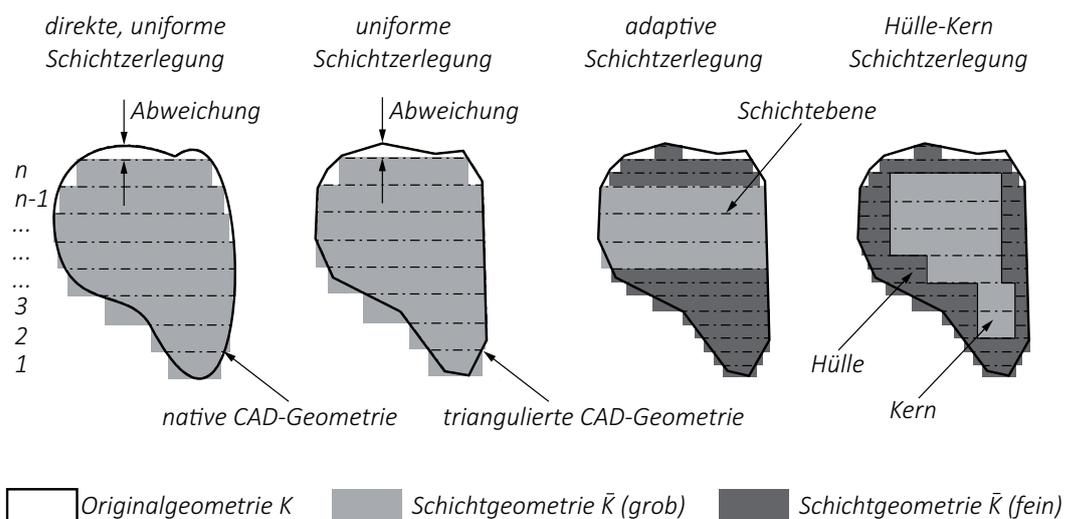


Abb. 5-16: Prinzipien der Schichtzerlegung

Darüber hinaus können die Ansätze zur Schichtzerlegung weiter klassifiziert werden. Neben der uniformen Schichtzerlegung (engl. uniform slicing) sind die adaptive Schichtzerlegung (engl. adaptive slicing) und das daran angelehnte Hülle-Kern-Prinzip (engl. z. B. accurate exterior, fast interior) bekannt. Üblicherweise wird im Anwendungsfall die uniforme Schichtzerlegung eingesetzt. Hier besitzen alle Schichten dieselbe Schichtdicke. Dies kann jedoch zu Abweichungen in der Bauteilhöhe zwischen der Originalgeometrie und der Schichtgeometrie führen. Daneben muss immer zwischen Wirtschaftlichkeit und Bauteilgenauigkeit abgewogen werden. Eine Reduzierung der Schichtzahl kann auch zu reduzierten Kosten führen [ZäHa06]. Dies geht jedoch mit der Verstärkung von Schichtzerlegungseffekten, wie dem Treppenstufeneffekt, einher. Um beides, Wirtschaftlichkeit und Bauteilgenauigkeit, besser in Einklang bringen zu können, existieren Ansätze der adaptiven Schichtzerlegung bzw. nach dem Hülle-Kern-Prinzip.

Ansätze zur adaptiven Schichtzerlegung gehen von verschiedenen Schichtdicken für einen Baujob aus. Dabei werden die Schichtdicken so variiert, dass Fehler unter ein akzeptierbares Maß sinken. Theoretisch kann jede Schicht eine andere Dicke aufweisen. Praktisch ist dies jedoch schwer umsetzbar, da die Fertigungsparameter so nur schwer abstimmbare sind.

Die Hülle-Kern-Methodik sieht vor, den Kern des Bauteils in anderen Schichtdicken zu fertigen als die Hülle. So müssen nur die Außenkonturen fein aufgelöst werden. Theoretisch denkbar ist auch eine Kombination aus adaptiver Schichtzerlegung und Hülle-Kern-Prinzip. Hier werden die Schichtdicken der äußeren Konturen dann noch adaptiv so angepasst, dass z. B. der Treppenstufeneffekt minimiert wird.

In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über wesentliche Veröffentlichungen und Software-Anwendungen zu dem Thema Schichtdatengenerierung gegeben. Zur Ergänzung wird auf Schillen verwiesen. Er beschreibt in seiner Dissertation „*Erzeugung hochgenauer Schichtzerlegungen von 3D-Modellen für den Einsatz in Rapid-Prototyping Anwendungen*“ [Sc02] viele Ansätze, die bis 2001 als wesentliche Literatur zitiert werden können. Ebenso werden von Schillen weitere Einzelheiten der Schichtdatenerzeugung detailliert diskutiert. In 2003 veröffentlichten Mohan et al. [MoVe03] ebenfalls ein umfassendes Review zu den bis zu diesem Zeitpunkt bekannten Techniken.

5.3.1 Uniforme Schichtdatengenerierung

Im Grundlagenteil dieser Arbeit (Abschnitt 2.2.1.4) ist die Vorgehensweise der uniformen Schichtdatengenerierung bereits erläutert worden. Als Ergänzung wird hier noch die von Dolenc, Makelä et al. beschriebene Inklusionseigenschaft aufgeführt

[DoMä94]. Ein Ansatz zur Nutzung wird z. B. von Kulkarni, Dutta et al. beschrieben [KuDu96].

So ist es bei der Schichtdatengenerierung notwendig, für den gewählten Algorithmus eine Inklusionsbeziehung zwischen der Originalgeometrie K und der Schichtgeometrie \bar{K} zu definieren. Hier können vier Fälle unterschieden werden. Im ersten Fall (Abb. 5-17 a) liegt die Schichtgeometrie \bar{K} vollständig innerhalb von der Originalgeometrie ($\bar{K} \subseteq K$), im zweiten Fall (Abb. 5-17 b) liegt die Originalgeometrie vollständig innerhalb der Schichtgeometrie ($K \subseteq \bar{K}$). Im dritten Fall (Abb. 5-17 c) werden die Schichten so angeordnet, dass eine gleichmäßige Verteilung des Fehlervolumens innerhalb und außerhalb von K erfolgt. Der vierte Fall (Abb. 5-17 d) beschränkt die Verteilung nicht, was der üblichen Vorgehensweise entspricht [Da10], [DoMä94], [Sc02].

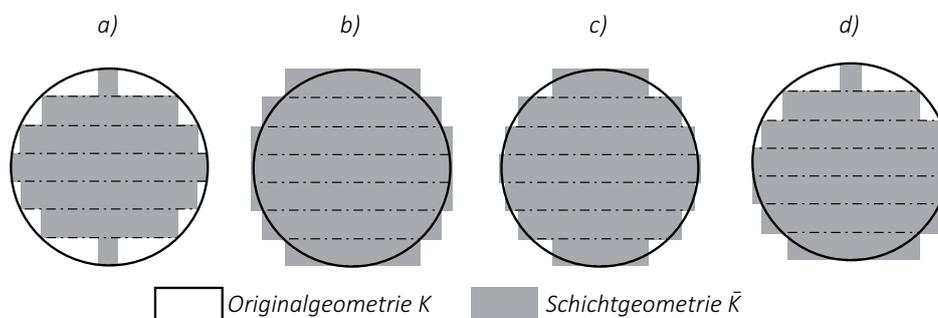


Abb. 5-17: Inklusionsbeziehungen bei der Schichtdatengenerierung nach [Sc02]

5.3.2 Adaptive Schichtdatengenerierung und Hülle-Kern-Ansätze

Die Ansätze der adaptiven (indirekten) Schichtzerlegung können in verschiedene Klassen eingeteilt werden (vgl. z. B. [Da10], [Sc02]). Verzichtet man zunächst auf die Ansätze zur direkten Schichtdatengenerierung sind die folgenden Klassen relevant:

- *Inkrementelle Schichtzerlegung*: Hier wird die Originalgeometrie entlang der Bau- richtung (von unten nach oben) schichtweise auf die maximal zulässige Schichtdicke geprüft. Diese Vorgehensweise soll vor allem die Ermittlung der minimal erforderlichen Schichtzahl sicherstellen, da immer die größtmögliche Schichtdicke gewählt wird. Im Gegensatz zur Top-down- oder Bottom-up- Methodik, muss die gewählte Schichtdicke hier auch nicht zwangsläufig ein Vielfaches der minimal zulässigen Schichtdicke sein.
- *Top-down-Schichtzerlegung*: Die Top-down-Methodik sieht eine schrittweise Verfeinerung vor. Hierzu wird die Originalgeometrie zunächst in eine Schichtgeometrie mit größtmöglichen Schichtdicken überführt. Schrittweise wer-

den diese dann auf Verfeinerung geprüft und wenn notwendig durch Schichten mit kleinerer Schichtdicke substituiert.

- *Bottom-up-Schichtzerlegung*: Im Gegensatz zur Top-down-Methode erfolgt zunächst eine möglichst feine Erzeugung der Schichtgeometrie. Anschließend werden dünne Schichten zu weniger Schichten mit größerer Schichtdicke zusammengefasst, wenn dies die geforderte Genauigkeit zulässt. Auch diese Ansätze erfolgen schrittweise, d. h., es erfolgt eine sukzessive „Vergrößerung“ der Schichtdicke.

5.3.2.1 Inkrementelle Ansätze zur Schichtzerlegung

Das 1994 von Dolenc und Mäkelä entwickelte *Cusp Height Concept* (CHC) zur adaptiven Schichtdatengenerierung ist einer der ersten dokumentierten Ansätze zur Erzeugung einer adaptiven Schichtdatenrepräsentation für die AF [DoMä94]. Ausgehend vom STL-Modell wird die jeweils erforderliche Schichtdicke ermittelt. Als Einstellungsparameter dient hier der Wert der Oberflächentoleranz C_{max} . Dieser dient zum Vergleich mit dem Betrag der jeweiligen Spitzenhöhe c (cusp height, vgl. auch Abb. 2-10). Die Abb. 5-18 zeigt die geometrischen Zusammenhänge.

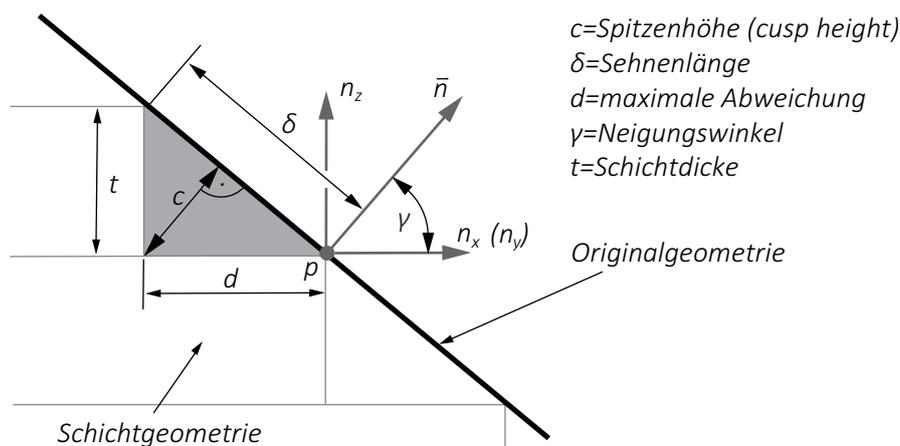


Abb. 5-18: Geometrische Zusammenhänge am Fehlerdreieck

Die Schichtdicke t an einem beliebigen Punkt p wird dann über den Normalenvektor \vec{n} für diesen Punkt optimiert. Dazu wird der Spitzenvektor \vec{c} ermittelt. Ist die Gleichung

$$|\vec{c}| = c \leq C_{max}, \text{ mit } \vec{c} = c \cdot \vec{n} \text{ und } \vec{n} = (n_x, n_y, n_z) \quad (5.4)$$

erfüllt, kann die Schichtzerlegung problemlos erfolgen. Die lokale Schichtdicke t wird anschließend über die folgende Gleichung bestimmt:

$$t = C_{max} / n_z, \text{ mit } n_z \neq 0 \text{ und } t_{min} \leq t \leq t_{max} \quad (5.5)$$

Dabei sind t_{min} und t_{max} die minimal und maximal zulässigen Schichtdicken. In allen anderen Fällen gelten für die Schichtdicken folgende Beziehungen:

$$t = t_{min} \text{ für } t < t_{min} \text{ oder } t = t_{max} \text{ für } t > t_{max}. \quad (5.6)$$

Die Prüfung erfolgt immer für alle Facetten eines Höhenniveaus. Im Anschluss wird mittels der Facette, welche die minimal notwendige Schichtdicke benötigt, das Optimum bestimmt.

1998 wird eine Erweiterung dieses Ansatzes von Tata et al. veröffentlicht [TaFa98]. Neben der bekannten Spitzenhöhe werden drei weitere Fehlermaße eingeführt. Dies sind zum einen die maximale Abweichung d und die Sehnenlänge (engl. chord length) δ (vgl. Abb. 5-18). Zum anderen wird ansatzweise ein Volumenfehler pro Längeneinheit beschrieben. Die maximale Abweichung und die Sehnenlänge können über den Neigungswinkel γ der Fläche wie folgt mit der Schichtdicke in Bezug gebracht werden:

$$d = t \cdot \tan \gamma \text{ und } \delta = t / \cos \gamma \quad (5.7)$$

Benutzerdefiniert wird dann vor der Schichtzerlegung der Parameter ausgewählt, der qualitätsbestimmend sein soll.

Vor der eigentlichen Schichtzerlegung sehen Tata et al. eine Prüfung zur Erkennung von topologischen Besonderheiten der Geometrie vor. Diese können bei der Schichtzerlegung zu signifikanten Fehlern führen und sind daher zu berücksichtigen. Entsprechend der Abb. 5-19 sind dies insbesondere:

- planparallel zur Schichtebene angeordnete bzw. in der Schichtebene liegende Flächen,
- gemeinsame Kanten zweier nicht komplanarer Flächen, die parallel zur bzw. in der Schichtebene liegen (pointierte Kanten) und
- gemeinsame Spitzen von mindestens zwei nicht komplanaren Flächen (pointierte Spitzen).

Die Schichtzerlegung erfolgt dann entlang der Baurichtung, analog zu der von Dolenc und Mäkelä entwickelten Vorgehensweise. Tritt währenddessen in dem ermittelten Bereich zwischen zwei Schichten \mathbf{z}_i und \mathbf{z}_{i+1} eine der o. g. Besonderheiten auf, muss eine dementsprechend andere Schichtdicke gewählt werden. So ist es z. B. das Ziel, bereits ebene Flächen auch über Schichtebenen abzubilden.

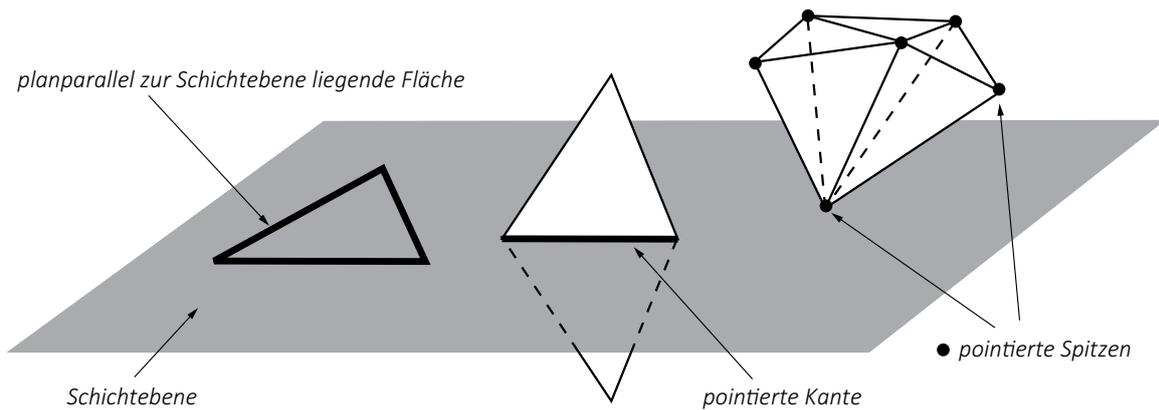


Abb. 5-19: Geometriemerkmale nach [TaFa98]

Cormier et al. erweitern die bestehenden Ansätze zudem um eine benutzerdefinierte Möglichkeit, die gewünschte Oberflächenqualität nicht nur global, sondern auch lokal zu definieren [CoUn00]. Dafür wird auf Basis der binären STL-Datei zunächst die Topologie für die vorhandenen Facetten erzeugt. Dies dient dazu, die Oberfläche des Bauteils, basierend auf einer Krümmungsanalyse, zu partitionieren. Der Benutzer kann anschließend diesen Flächenverbänden die gewünschten Oberflächeneigenschaften zuweisen. Diese Information wird dann in den beiden ungenutzten Bytes der jeweiligen Facette in der ursprünglichen STL-Datei ergänzt. So kann dies bei der anschließenden Schichtzerlegung, die auf dem CHC basiert, berücksichtigt werden.

Auch Mani et al. beschreiben mit dem von ihnen entwickelten regionsbasierten Ansatz (engl. Region-based adaptive slicing, RAS) eine Lösung, die lokal unterschiedliche Qualitätsanforderungen des Bauteils berücksichtigt [MaKu99]. Im Gegensatz zu Cormier et al. wird jedoch nicht rein die Oberfläche betrachtet, sondern komplette Volumenbereiche des Bauteils (siehe Abb. 5-20). So kann hier die Oberfläche z. B. feiner geschnitten werden als der Kern des Bauteils. Dieser Ansatz beschreibt somit eine mögliche Lösung zur Umsetzung einer Hülle-Kern-Strategie bei der Schichtdatengenerierung. Dazu wird das Bauteil vom Benutzer in entsprechende Regionen unterteilt, die dann CHC-basiert in Schichten zerlegt werden. Dabei kann regionspezifisch auch zwischen adaptiver und uniformer Schichtdatengenerierung unterschieden werden.

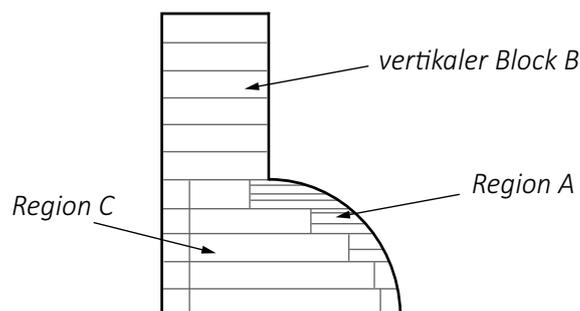


Abb. 5-20: Region-based adaptive slicing (RAS) nach [MaKu99]

Ansätze zur adaptiven Schichtzerlegung existieren auch in Verbindung mit Ansätzen zur optimalen Bauteilorientierung. Schon 1995 beschreiben Sreeram und Dutta eine mögliche Vorgehensweise, um diese Problemstellungen in Kombination zu lösen [SrDu95]. Weitergeführt werden diese Überlegungen von Byun und Lee [ByLe06]. Ihr Ansatz sieht auch vor, statt der Spitzenhöhe einen benutzerdefinierten Grenzwert für die Rauheitskenngröße Ra^{16} zu verwenden. Dabei ziehen Byun und Lee auch den Effekt von Stützkonstruktionen mit in Betracht. Ein ebenfalls auf Ra basierender Ansatz wurde schon zuvor von Pandey et al. entwickelt [PaRe03]. Dieser ist jedoch spezifisch für das FDM-Verfahren beschrieben worden. Der Nachweis einer Eignung für andere Verfahren ist nicht bekannt.

Eine von allen zuvor genannten Ansätzen verschiedene Methode wird 2001 von Luo und Chang veröffentlicht [LuCh01]. Im Gegensatz zu den auf dem CHC basierenden Methoden nutzen Luo und Chang die jeweiligen Schichtkonturen und Flächenschwerpunkte für die Berechnung der maximalen Schichtdicken. Zunächst werden dazu die STL-Daten so sortiert, dass eine in Baurichtung fortschreitende Schichtzerlegung erfolgen kann. Im Anschluss werden schrittweise Schichten in der maximalen Schichtdicke erzeugt. Für zwei aufeinanderfolgende Schichten \mathbf{z}_i und \mathbf{z}_{i+1} werden jeweils die Schichtkonturen gebildet. Hier müssen interne und externe Konturen unterschieden werden. Für jede Kontur wird anschließend die Länge des umschließenden Polygons ermittelt. Basierend auf der Abweichung dieser Längen ΔC von einer Schicht auf die andere erfolgt die Bewertung, ob die Schichtdicke t zu reduzieren ist. Für den Fall, dass keine Abweichung zwischen den Längen von korrespondierenden Konturen vorliegt, wird eine weitere Prüfung vorgenommen. Um sicherzugehen, dass trotz Konturen mit gleichem Umfang keine zu große Verschiebung vorliegt, wie es z. B. bei einem schiefen Zylinder der Fall ist, wird in diesen Fällen noch die Verschiebung der Flächenschwerpunkte ΔG bewertet. Verschieben sich diese in zu großem Maß orthogonal zur Baurichtung, muss ebenfalls die Schichtdicke reduziert werden. Die Berechnungen von ΔC mit den Punkten der Polygone \mathbf{p} sowie von ΔG mit den X - und Y -Koordinaten der Schwerpunkte erfolgt dabei nach folgenden Gleichungen:

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n (p_{i+1} - p_i) - \sum_{j=1}^m (p_{j+1} - p_j) \quad (5.8)$$

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{m \sum_{i=1}^n X_i - n \sum_{j=1}^m X_j}{mn}\right)^2 + \left(\frac{m \sum_{i=1}^n Y_i - n \sum_{j=1}^m Y_j}{mn}\right)^2} \quad (5.9)$$

¹⁶ Arithmetischer Mittenrauwert (Ra): arithmetischer Mittelwert der Beträge aller Ordinatenwerte $Z(x)$ innerhalb einer Einzelmessstrecke l_r . Rauheitskenngröße nach DIN EN ISO 4287.

für $\Delta C \neq \mathbf{0}$ ergibt sich die Schichtdicke t nach der Gleichung:

$$t = t_{max} \cdot \sin\left(\tan^{-1} \frac{t_{max}}{|\Delta C|}\right) \quad (5.10)$$

und für $\Delta C = \mathbf{0}$ nach der Gleichung:

$$t = \frac{t_{max}^2}{\sqrt{|\Delta G|^2 + t_{max}^2}} \quad (5.11)$$

Schillen beschreibt in seiner Dissertation einen Ansatz, der eine bereichsweise Schichtzerlegung in Baurichtung vorsieht [Sc02]. Zunächst wird die Komplexität der Oberfläche analysiert, und die Bereiche hoher Komplexität werden gekennzeichnet. Dann folgt, abhängig von der Komplexität, eine in Baurichtung fortlaufende bereichsweise Unterteilung. Diesen Bereichen wird je eine Schichtdicke zugewiesen. Die Schichtzerlegung der Bereiche erfolgt nach zwei von Schillen vorgeschlagenen Szenarien. Das erste Szenario sieht vor, die Bereiche mit einer Schichtdicke aus einer Menge von benutzerdefinierten Schichtdicken zu zerlegen. Das zweite Szenario beschreibt einen Algorithmus, der eine definierte Anzahl an unterschiedlichen Schichtdicken selbst ermittelt, und als Ergebnis die Optimale auswählt. Schillen erläutert in diesem Rahmen, dass eine höhere Variation als fünf verschiedene Schichtdicken beim damaligen Stand der Anlagentechnik nicht sinnvoll implementiert werden konnte. Diese Annahme kann auch für derzeitig verfügbare Anlagen so beibehalten werden.

5.3.2.2 Top-down- und Bottom-up-Ansätze

Im Gegensatz zu den im vorherigen Absatz beschriebenen inkrementellen Ansätzen sind die Top-down- bzw. Bottom-up-Ansätze dadurch gekennzeichnet, dass zunächst eine möglichst grobe bzw. möglichst feine Schichtzerlegung erfolgt. Dann werden bei Bedarf große Schichtdicken verfeinert oder kleine Schichtdicken zusammengefasst.

Tyberg und Bøhn beschreiben eine Methodik, wie mittels der Top-down-Vorgehensweise eine lokale adaptive Schichtzerlegung erfolgen kann [TyBø98]. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Tatsache gelegt, dass bei der herkömmlichen adaptiven Schichtzerlegung immer der gesamte Bauraum mit denselben Schichtdicken versehen wird. Fertigt man nun mehrere verschiedene Bauteile simultan, können die Schichtdicken zwar für ein Bauteil, nicht jedoch für alle sinnvoll sein. Daher schlagen Tyberg und Bøhn eine Methode zur lokalen, z. B. bauteilabhängigen, adaptiven Schichtzerlegung vor. Die Abb. 5-21 zeigt diese Vorgehensweise im Vergleich zu dem üblichen Ansatz. Die Top-down-Vorgehensweise wurde von Tyberg und Bøhn gewählt, da so sichergestellt werden kann, dass die Schichtniveaus auch bei unterschiedlichen Schichtdicken der Bauteile zusammenfallen. So werden erst alle Tei-

le mit der größtmöglichen Schichtdicke geschnitten. Lokal erfolgt dann eine Substitution mit feineren Schichtdicken. Ein Vielfaches der kleinen Schichtdicken muss demzufolge immer die größtmögliche Schichtdicke ergeben. Evaluiert wurde dieser Ansatz mit dem FDM-Verfahren.

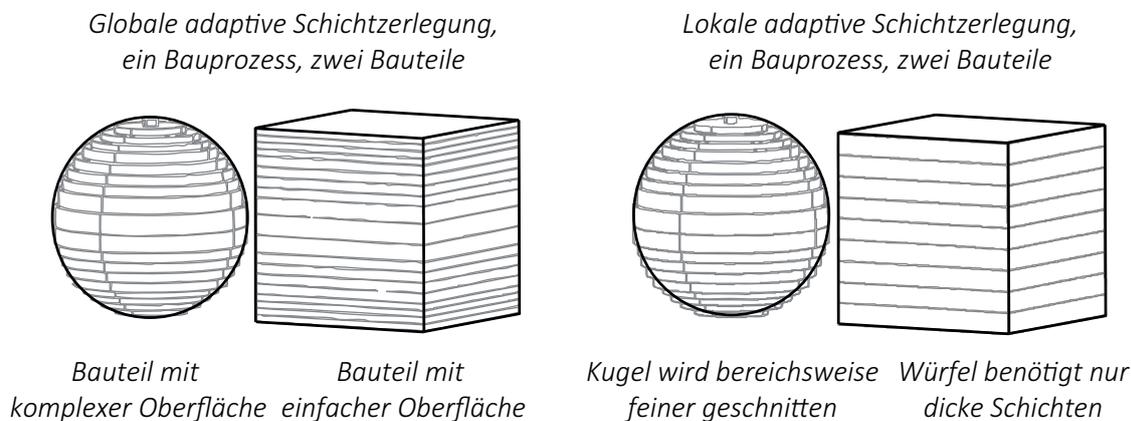


Abb. 5-21: Lokale adaptive Schichtzerlegung nach [TyBø98]

Ein auf Top-down und dem CHC basierendes Konzept zur Umsetzung einer Hülle-Kern-Lösung (engl. accurate exterior, fast interior) wurde von Sabourin et al. entwickelt [SaHo97]. Basierend auf einer von ihnen selbst entwickelten Vorgehensweise zur schrittweisen Verfeinerung der Schichtdicke [SaHo96] (vgl. Abb. 5-21, globale adaptive Schichtzerlegung), beschreiben Sabourin et al. wie durch Verschiebung der Querschnittskonturen in Richtung des Bauteilinneren (Abb. 5-22) eine bereichsweise adaptive Schichtzerlegung erfolgen kann. Nach dieser werden unterschiedliche Schichtdicken für Hülle und Kern vorgesehen. Dies ermöglicht kürzere Bauzeiten bei gleichbleibenden oder verbesserten Oberflächeneigenschaften und bereichsweise angepassten Materialeigenschaften. Der Ansatz wurde auf einer *Stratsys FDM 1600* umgesetzt und erprobt, erforderliche Stützkonstruktionen etc. wurden ebenfalls implementiert.

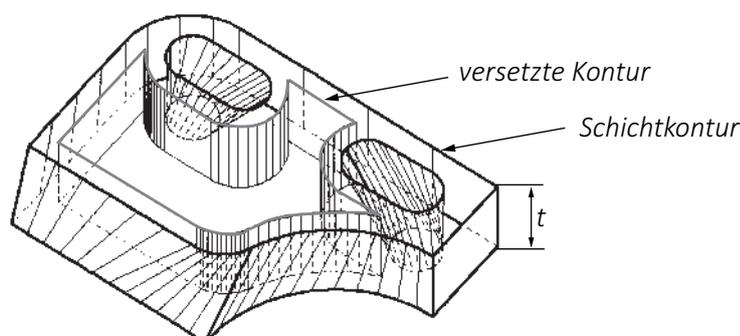


Abb. 5-22: Konturenversatz in einer Schicht nach [SaHo97]

Bei der Bottom-up-Schichtdatengenerierung wird das Modell zunächst mit der minimal vorgesehenen Schichtdicke zerlegt, anschließend wird geprüft, ob aufeinander

folgende Schichten zusammengefasst werden können. Dies wird so lange durchgeführt, bis ein, z. B. nach dem CHC definierter Grenzwert erreicht wird. Nachteilig an diesen Konzepten ist, dass die Zerlegung immer in der minimalst möglichen Schichtdicke erfolgt. Kritische Stellen werden somit ggf. nicht berücksichtigt (vgl. Abb. 5-19). Ein Ansatz, der diese Vorgehensweise vorsieht, wurde von Jeng et al. entwickelt [JeWo00]. Zur Überprüfung wird hier, vergleichbar mit Luo und Chang [LuCh01], die Abweichung der aufeinanderfolgenden Schnittkonturen bewertet.

5.3.3 Direkte Schichtdatengenerierung

Bereits 1995 beschrieben Jamieson et al. die Vorteile der direkten Schichtdatengenerierung in Verbindung mit einem Lösungsansatz [JaHa95]. Vorteil ist vor allem die Substitution der STL-basierten Vorgehensweise, wodurch eine höhere Genauigkeit erreicht wird und Fehler, die beim STL Export auftreten, vermieden werden. Der Ansatz von Jamieson et al. sieht vor Parasolid Modelle direkt in die Schichtdatenformate CLI und HPGL zu überführen. Hier benennen die Autoren direkt das Problem, dass die gewonnene Genauigkeit bei Nutzung eines polygonbasierten Schichtdatenformats, wie CLI, teilweise wieder verloren geht. Trotzdem wird eine Lösung entwickelt. Diese berücksichtigt auch Probleme, die aus der Boundary Representation¹⁷ (B-Rep) Geometrie der Parasolid Modelle resultieren.

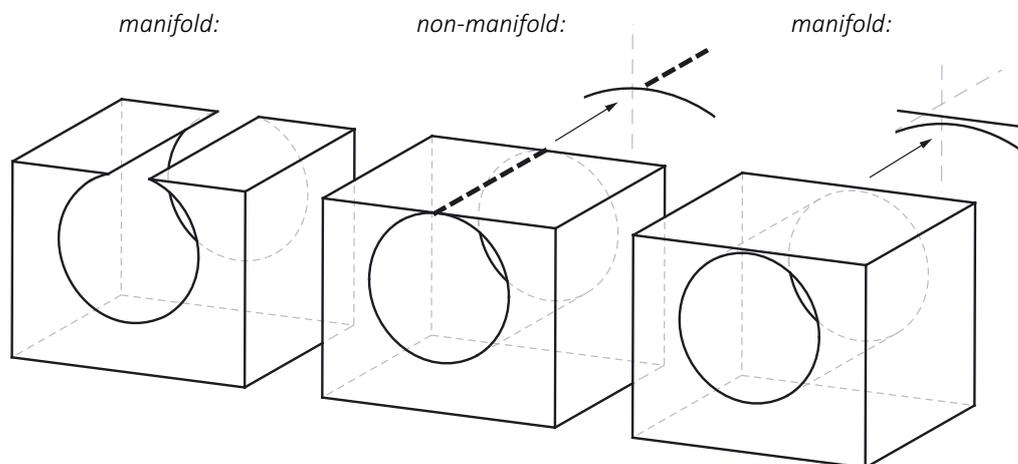


Abb. 5-23: Non-manifold Problematik bei B-Rep Modellen

Eine Fehlerquelle ist insbesondere die non-manifold Problematik, die beim Schneiden von Parasolid Modellen auftreten kann. So ist es in B-Rep Modellen unmöglich, dass ein Körper sich selbst schneidet oder sich an einem Punkt bzw. einer Linie berührt.

¹⁷ Bei der Flächenbegrenzungsmethode (*Boundary Representation*) handelt es sich um eine Volumenbeschreibungsmethode, welche die Geometrie durch die umhüllenden Begrenzungsflächen bzw. durch deren Begrenzungen und zusätzlich durch die Angabe der Lage des Materials relativ zur Begrenzungsfläche erfasst. Die Berandung eines geometrischen Körpers setzt sich aus den topologischen Primitiven Fläche, Kante und Ecke zusammen. [Kö14]

Mathematisch bedeutet dies, dass jedes B-Rep Modell die Euler-Poincaré Gleichung erfüllen muss [Kö14]:

$$V - E + F - R = 2(S - G) \quad (5.12)$$

Dabei sind V die Anzahl der Ecken (vertex), E die Anzahl der Kanten (edge), F die Anzahl der Flächen (face), R die Anzahl der inneren Zyklen (ring), S die Anzahl der Körper (shell) und G die Anzahl der Löcher (genus). Wird nun ein stabiles Modell in Schichten zerlegt, kann es passieren, dass durch die Lage einer Schichtebene ein instabiler Zustand erreicht wird. Für diesen Fall sehen Jamieson et al. vor, das Modell auf den zuletzt funktionierenden Zustand zurückzusetzen und die Schichtzerlegung an dieser Stelle minimal zu variieren (vgl. Abb. 5-23).

Yan et al. beschreiben 2004 einen STEP-basierten Ansatz [YaZh04]. Zwar liegt hier keine direkte Schichtzerlegung der nativen CAD-Geometrie vor, die NURBS¹⁸-beschriebene STEP-Geometrie ist jedoch so nah an die native CAD-Geometrie angelehnt, dass dieser Fall auch als direkte Schichtdatengenerierung bezeichnet wird. Yan et al. sehen zunächst den Import der STEP-Daten in ihr Programm vor, dann kann der Nutzer dieses verwenden, um z. B. die Bauteilorientierung anzupassen. Die eigentliche Schichtzerlegung erfolgt basierend auf dem CHC, wobei die Flächen mit individuellen Qualitätseigenschaften versehen werden können. Vor der eigentlichen Schichtzerlegung werden kritische Modellbereiche (vgl. Tata et al. [TaFa98]) erkannt. Horizontale Flächen dienen hierbei zur Einteilung von Blöcken, die dann jeweils adaptiv in Schichten zerlegt werden.

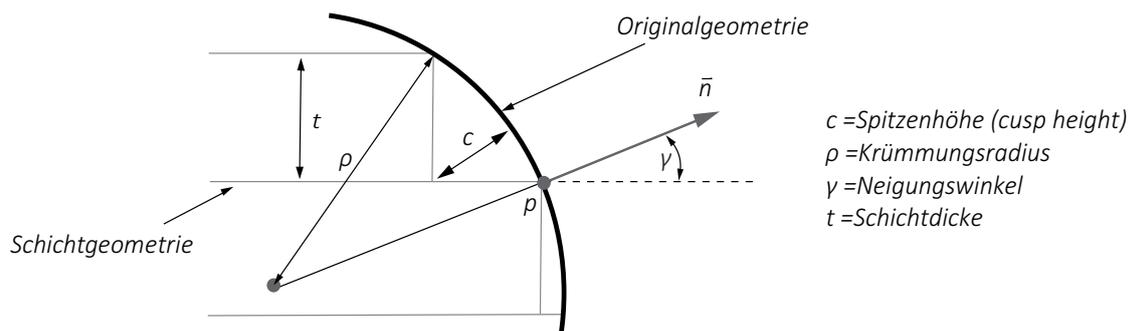


Abb. 5-24: Anwendung des CHC auf die direkte Geometrie nach [YaZh04]

Die adaptive Berechnung der Schichtdicke t erfolgt hier in Anlehnung an das CHC für den Punkt p und die Spitzenhöhe c nach folgender Gleichung (vgl. Abb. 5-24):

$$t = -s_c \rho \sin \gamma + s_c \sqrt{\rho^2 \sin^2 \gamma + 2s_c \rho c - s_c s_t s_k c^2} \quad (5.13)$$

¹⁸ Non-uniform rational B-Spline (NURBS): mathematisch definierte Kurve oder Fläche, die zur Modellierung beliebiger Formen verwendet wird. Siehe. z. B. [PiTi97], [Sa06].

Dabei ist ρ der Krümmungsradius der Normalkrümmung am Punkt p . Die Variablen s_c , s_t und s_k werden wie folgt definiert:

$$s_c = \begin{cases} 1 & \text{für } p \text{ liegt auf dem oberen Halbkreis} \\ -1 & \text{für } p \text{ liegt auf dem unteren Halbkreis} \end{cases} \quad (5.14)$$

$$s_t = \begin{cases} 1 & \text{für positive Materialtoleranz: } K \subseteq \bar{K} \\ -1 & \text{für negative Materialtoleranz: } \bar{K} \subseteq K \end{cases} \quad (5.15)$$

(vgl. Inklusionsbeziehungen, Abb. 5-17)

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{für konvex (positive Normalkrümmung)} \\ -1 & \text{für konkav (negative Normalkrümmung)} \end{cases} \quad (5.16)$$

Ma et al. beschreiben ebenfalls einen NURBS-basierten Ansatz zur direkten Schichtzerlegung [MaBu04]. Sie ergänzen die bekannten Überlegungen um eine umfangreiche Voruntersuchung der Geometrie, welche kritische Stellen, wie Spitzen o. ä., abfangen soll. Basierend auf der Voruntersuchung erfolgt dann die Schichtzerlegung, ähnlich wie bei [YaZh04]. Ergänzt wird der Ansatz ebenfalls durch eine Lösung zur Pfadgenerierung. Umgesetzt und erprobt wurde diese Lösung mit dem FDM-Verfahren. Der Ansatz von Starly et al. verfolgt auch die NURBS-basierte Methodik der Schichtdatengenerierung [StLa05]. Basierend auf STEP-Daten der Modelle wird in diesem Fall eine Raycasting¹⁹ Methode vorgeschlagen. Dazu werden die NURBS-Flächen durch Bounding-Boxen vereinfacht, wodurch die Berechnung von Durchdringungen erleichtert wird.

Hayasi et al. präsentieren einen Ansatz, der Schichtdaten direkt aus der CAD-Umgebung (*Autodesk Inventor*) generiert [HaAs13]. Dazu wird die *Inventor VBA API* genutzt. Der Nutzer kann letztlich auswählen, ob die Geometrie uniform oder adaptiv in Schichten zerlegt werden soll. Dieser Ansatz basiert auf dem Vergleich der Schnittkonturen adjazenter Schichten sowie der Erzeugung von Fehlerdreiecken. Die Vorgehensweise ist hierbei eine Bottom-up-Methodik. Es erfolgt so schichtweise immer die Prüfung, ob die minimale Schichtdicke erforderlich ist. Falls nicht, werden Schichten zusammengefasst. Als eine der wenigen dokumentierten Lösungen wird hier die tatsächliche CAD-Geometrie unter Nutzung der vorhandenen CAD-Werkzeuge für die Schichtdatengenerierung genutzt.

Für Anwendungen des Reverse Engineering ist eine Lösung von Wu et al. bekannt [WuWo04]. Es wird beschrieben, wie Schichtdaten direkt aus Punktwolken erzeugt werden können. Somit erübrigt sich der sonst zwischengelagerte Schritt der Geometrierzeugung aus den erfassten Messdaten. Da es sich hier um keine direkte

¹⁹ Raycasting (eng. ray casting): Methode zur Visualisierung von skalaren Funktionen in einem dreidimensionalen Volumen. Siehe z. B. [PaSp06].

Schichtdatengenerierung im eigentlichen Sinne handelt, wird nicht weiter auf die Umsetzung eingegangen.

Weitere Veröffentlichungen mit grundlegenden Ansätzen für die direkte, adaptive Schichtdatenerzeugung existieren z. B. von Hope et al. ([HoJa97], [HoRo97]), Ma et al. [MaHe99], Lee et al. [LeCh00] oder Zhao et al. [ZhLu00]. Da diese von Mohan et al. [MoVe03] bereits zusammenfassend beschrieben wurden, wird an dieser Stelle auf die jeweilige Betrachtung verzichtet.

5.3.4 Softwarelösungen für die Erzeugung von Schichtdaten

Für alle auf dem Markt verfügbaren Anlagensysteme existiert entsprechende Software zur Schichtdaten- und Pfaderzeugung. Dies erfolgt üblicherweise basierend auf dem de facto Industriestandard STL durch Implementierung der o. g. Algorithmen. Neben den Algorithmen zur eigentlichen Schichtdatengenerierung durch Schneiden der STL-Geometrierepräsentation sind üblicherweise auch leistungsstarke Algorithmen zur Bereinigung und Optimierung der Konturdaten auf Schichtebene implementiert. Hier bietet der *Materialise Magics Bild Processor* eine anlagenspezifische Lösung zur Erzeugung und Optimierung von Schichtdaten. Auch Ansätze zur Umsetzung von Hülle-Kern-Strategien sind teilweise vorgesehen (z. B. *Materialise AutoFab Suite* [Ma15b]). Für die direkte Schichtdatengenerierung aus dem CAD-System ist keine Software bekannt. Native CAD-Daten können jedoch üblicherweise von der Software zur Prozessvorbereitung importiert werden. Intern erfolgt dann jedoch eine Umwandlung in eine tesselierte Geometrierepräsentation, wie STL, um die darauf basierenden Algorithmen nutzen zu können.

5.3.5 Auswahl der Lösungsansätze zur Erzeugung von Schichtdaten

Für die Schichtdatengenerierung kann somit dasselbe festgestellt werden, wie für die anderen zuvor beschriebenen prozessvorbereitenden Teilaufgaben. Lösungen sind vor allem für STL-basierte Ansätze verfügbar. Wenige Autoren beschreiben auch Lösungen für die direkte Schichtdatengenerierung aus der CAD-Umgebung – diese sind eine gute Grundlage für weitere Entwicklungen. Kommerziell erhältliche Lösungen beschränken sich auf die Verarbeitung von STL-Daten oder den Import nativer CAD-Daten mit anschließender Überführung dieser in ein trianguliertes Modell. Die gute Dokumentation der verfügbaren Lösungen und Ansätze macht eine Übertragung verschiedener Konzepte, wie dem CHC, in die CAD-Umgebung denkbar. Prinzipiell verfügen moderne CAD-Systeme bereits über Lösungen für verschiedene Teilprobleme der Schichtdatengenerierung, z. B. die Erzeugung von Schichtkonturen oder Werkzeugen zur Krümmungsanalyse der Oberfläche. Die Verknüpfung dieser mit den zuvor beschriebenen Ansätzen könnte demnach erfolgen.

In diesem Rahmen ist die von Hayasi et al. beschriebene Lösung ein guter Ausgangspunkt, da bereits eine CAD-basierte Vorgehensweise erläutert wird. Dieser Lösungsansatz kann demnach mit den „vorhandenen“ CAD-Bordwerkzeugen implementiert werden. Die Kombination mit der Top-down-Methodik von Tyberg und Bøhn kann an dieser Stelle erfolgen, um eine adaptive Schichtzerlegung simultan gefertigter Bauteile zu unterstützen. Die grundlegenden Ansätze zum CHC, ob STL-basiert nach Dolenc und Mäkelä oder auf direkte Geometrie angewendet, wie nach Yan et al., sind ebenfalls Grundlage für den Lösungsansatz. Ebenfalls berücksichtigt werden müssen die Fehlerstellen, die durch Geometrieschnitte auftreten (non-manifold Problematik). Welche der genannten Lösungsansätze letztlich ausgewählt werden, hängt auch von der genutzten CAD-Software ab. Je nachdem welche Ausgangsdaten für eine Optimierung bereitgestellt werden können, erfolgt dann die Auswahl eines geeigneten Ansatzes zur Schichtdatengenerierung.

5.4 Heterogene Material- und Bauteileigenschaften

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen prinzipiell, z. B. durch die Anpassung der Prozessparameter und Belichtungspfade, die Einstellung von heterogenen Materialeigenschaften in einem Bauteil. Problematisch ist jedoch die vorherige Abbildung dieser Materialeigenschaften im 3D-CAD-Modell.

Zur Abgrenzung ist zu erwähnen, dass „heterogen“ im Kontext der 3D-CAD-Modellierung auch für die Beschreibung des Verwendens von Daten aus unterschiedlichen CAD-Systemen in einer Umgebung genutzt wird. Heterogene CAD-Modelle sind nach dieser Definition Modelle, deren Ursprung nicht in einem, sondern in mehreren Systemen liegt. Relevant ist dies vor allem bei Baugruppen. Im Kontext dieser Arbeit werden mit „heterogen“ jedoch solche Bauteile bezeichnet, die keine homogenen Materialeigenschaften aufweisen. Dies soll bedeuten, dass

- lokal Bereiche mit unterschiedlichen Materialeigenschaften vorliegen,
- gradierte Materialeigenschaften vorliegen oder
- die Material- bzw. Bauteileigenschaften bereichsweise durch spezielle Strukturen erzeugt werden.

Das Ausgangsmaterial, mit dem diese Eigenschaften erzeugt werden, wird hier als konstant angenommen, da bei den betrachteten Verfahren keine Verarbeitung von unterschiedlichen Ausgangsmaterialien in einem Prozess üblich ist. Bis 2005 bestehende Ansätze werden z. B. von Chen et al. und Kou et al. zusammengefasst [ChFe04], [KoTa05]. Grundlegende Ansätze werden in Folge kurz beschrieben und neuere ergänzt.

5.4.1 Ansätze zur Abbildung von heterogenen Materialeigenschaften

Erste Ansätze sind, motiviert durch die Möglichkeiten der AF Bauteile mit heterogenen Materialeigenschaften herzustellen, von Kumar und Dutta veröffentlicht worden [KuDu98]. Dazu wird ein Objekt in Untermengen unterteilt, die jeweils nur aus einem Werkstoffgefüge bestehen. Mithilfe von booleschen Operatoren können Verbindungen von allen Untermengen zur Gesamtmenge erzeugt werden. Zur Beschreibung führen Kumar und Dutta das r_m -Set und r_m -Objekt(-modell) ein. Das r_m -Set beschreibt eine Punktmenge, bei der für jeden enthaltenen Punkt die Materialeigenschaften von derselben Funktion beschrieben werden. Diese Methodik der Zuweisung von Funktionen zur Materialbeschreibung auf einzelne Punkte des Modells wird als Mapping bezeichnet. Das r_m -Objekt(-modell) ist dann die Summe mehrerer r_m -Sets und repräsentiert das gesamte Bauteil mit heterogenen Materialeigenschaften.

Weitere Ansätze sind an die FE-Methodik der Diskretisierung des Modells angelehnt. Hier haben Jackson et al. einen volumenbasierten Ansatz entwickelt, der ein Modell durch ein Netz aus linearen Tetraedern abbildet [JaLi99]. So können für die einzelnen Tetraeder die Werkstoffeigenschaften beschrieben und somit in Summe heterogene Materialeigenschaften abgebildet werden. Problematisch an dieser Methode ist jedoch, dass für eine ausreichend gute Abbildung der Materialeigenschaften fein aufgelöste Tetraedernetze erzeugt werden müssen. So beschreibt Liu, dass bei dieser Vorgehensweise z. B. ein Würfel, der in der STL-Repräsentation aus 9 408 Facetten besteht, durch 109 760 Tetraeder diskretisiert werden müsste [Li00].

Ähnliches gilt für voxelbasierte Lösungen. Die Repräsentation des Modells in einer voxelbasierten Form ermöglicht zwar, abhängig von der gewählten Auflösung, eine detaillierte Abbildung von Bauteileigenschaften in unterschiedlichen Bereichen. Feine Auflösungen sind jedoch mit hohen Rechenzeiten verbunden. Des Weiteren treten ähnliche Fehler wie bei der Schichtdatengenerierung auf. Durch die Voxel entsteht so eine Ungenauigkeit an den Bauteilgrenzen, ähnlich des Treppenstufeneffekts. Um dies zu vermeiden, existieren Ansätze, die an den Bauteilgrenzen feinere Unterteilungen des Gitters vorschlagen (Octree Methode). Dies führt jedoch zu noch größerem Speicherbedarf [Hä98].

Eine weitere Möglichkeit zur Abbildung heterogener Materialeigenschaften wird in der Nutzung von expliziten und impliziten Funktionen gesehen. Ansätze zur Beschreibung mit linearen, exponentiellen oder parabolischen Funktionen sind von Elishakoff et al. [ElGe05] und Erslan et al. [ErAk06] bekannt. Mit expliziten Funktionen können ein-dimensional veränderliche Werkstoffgradienten gut beschrieben werden, so lange es sich bei den Bauteilen um einfache geometrische Objekte, wie Zylinder, Ringe oder Kugeln handelt. Die Heterogenität muss hier immer in Abhängigkeit von einem Koordinatensystem definiert werden. Ist eine Beschreibung der Materialverteilung mit

expliziten Funktionen nicht möglich, können auch implizite Funktionen genutzt werden [PaCr01].

Featurebasierte Lösungen zur Beschreibung von heterogenen Materialeigenschaften sind ebenfalls bekannt. Siu und Tan veröffentlichten hierzu einen Ansatz, der mittels einer Bezugsreferenz (Ebene, Achse, Punkt) die Materialverteilung in einem Feature beschreibt [SiTa02]. Der Ansatz konnte erfolgreich an einem 3D-Printing Bauteil evaluiert werden. Biwas et al. nutzen eine Taylorreihe zur Beschreibung der Materialfunktion ausgehend von einem Punkt im Bauteil [BiSh04]. Diese Lösungen sind jedoch nur bei einfacheren, eindimensionalen Problemstellungen nutzbar. Sind die Werkstoffänderungen multidirektional und die Bauteile komplex, müssen die Feature anders gestaltet werden. Lösungen hierzu sind von Samanta et al. bekannt [SaKo05]. Über Werkstofffeatures, die mittels Kontrollpunkten gesteuert werden, bleibt das Materialfeature auch bei Geometrieänderungen stabil. Ebenso beschreiben Samanta et al. eine Lösung zur Definition des Materialverhaltens über Freiformflächen. Kou und Tan stellen die „Heterogeneous Feature Tree (HFT)“ Methode zur Abbildung der Materialverteilung vor [KoTa05]. Die Umsetzung erfolgte in einer eigens entwickelten Softwareumgebung *CAD4D*. Die Objekte werden in Flächen und Kurven bzw. Linien unterteilt. Hierdurch kann eine mehrdimensionale Materialverteilung umgesetzt werden. Dabei werden die Flächen entlang von Leitkurven ausgetragen. Die Leitkurven und Berandungskurven der Flächen beschreiben hierbei den Verlauf der Materialeigenschaften.

Eine weitere Lösung stellt die Generierung von Verbundmodellen dar. Verbundmodelle substituieren das Bauteil in mehrere kleinere Objekte, für die jeweils das Materialverhalten beschrieben werden kann. Ein Ansatz ist eine baugruppenbasierte Vorgehensweise, bei der jedes Einzelteil ein Subobjekt mit einheitlicher Werkstoffdistribution darstellt. Dazu können entweder Grenzflächen bestehender Primitive genutzt werden [KuDu98], [SuHu02], oder die Geometrie in separate Komponenten definiert getrennt werden [LiMa04]. Sun und Hu konnten durch eine *PTC Pro/ENGINEER* Implementierung zeigen, dass der entwickelte Algorithmus auch im CAD-Umfeld nutzbar ist.

Hongmei et al. beschreiben in mehreren Veröffentlichungen, wie sie durch die Modellierung eines Mehrfarben-Distanzfelds sowohl Materialeigenschaften als auch die Bauteilgeometrie abbilden können. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls vorgestellt, wie diese Vorgehensweise am Beispiel einer Multimaterial-Turbinenschaufel umgesetzt werden kann. Dieser Ansatz ermöglicht es, Schichtdaten abzuleiten. Er kann auch für Reverse Engineering Anwendungen genutzt werden, da Punktwolken direkt verarbeitet werden können [HoGe13], [HoZh09]. Die Umsetzung heterogener Bauteil-

eigenschaften in eine Schichtdatenrepräsentation wurde z. B. auch von Su et al. ansatzweise beschrieben [SuYu06].

5.4.2 Softwarelösungen zur Modellierung von heterogenen Bauteileigenschaften

Im Bereich der additiven Fertigung bieten die verfügbaren Softwarelösungen vor allem die Möglichkeiten, die STL-Geometrie der Bauteile so anzupassen, dass bestimmte Bereiche durch definierte Strukturen abgebildet werden. Dies können Gitterstrukturen zum Leichtbau oder poröse Strukturen, z. B. für medizinische Zwecke, sein. Lösungen sind von den bekannten Softwareanbietern wie *Materialsie* [Ma15c] oder *netfabb* [Ne15b] verfügbar.

Multimaterialbauteile werden z. B. im FDM-Verfahren dadurch realisiert, dass die Stützkonstruktionen aus anderem Material als das Bauteil gefertigt werden können. Auch für die Bauteile sind, abhängig von der Düsenzahl, mehrere Materialien denkbar. Umgesetzt wird dies jedoch mit der anlagenspezifischen Software und nicht zuvor im CAD-System.

Für voxelbasierte Lösungen existieren ebenfalls verschiedene Programme, vor allem aus dem Bereich der Medizintechnik oder der Computerspielentwicklung und 3D-Animation. Auf diese wird hier jedoch nicht näher eingegangen.

5.4.3 Auswahl der Lösungsansätze zur Abbildung von heterogenen Bauteileigenschaften

Als Fazit kann festgehalten werden, dass zwar Lösungen für die STL-basierte Erzeugung von Strukturen existieren, 3D-CAD-Programme den Konstrukteur jedoch noch nicht umfassend bei der Gestaltung von Bauteilen mit heterogenen Materialeigenschaften unterstützen. Hier können zukünftig vor allem die featurebasierten Ansätze, wie von Siu und Tan oder Samanta et al., eine integrierbare Lösung darstellen. Ebenfalls betrachtet werden die Baugruppenansätze, wie z. B. die Lösung von Sun und Hu, welche bereits einen Ansatz für eine *Pro/ENGINEER* Integration aufzeigt und somit im CAD-Umfeld nutzbar ist. Als in diesem Rahmen nur bedingt integrierbar werden die voxel- oder FE-basierten Ansätze bewertet, da das vorhandene CAD-Modell dazu zunächst in eine entsprechende Form überführt werden muss, was zu vermeiden ist. Um die Materialeigenschaften datenbankbasiert beschreiben zu können, sind vor allem Ansätze verwertbar, die eine mathematische Beschreibung der Eigenschaften beinhalten. Diesbezüglich können die Lösungen von Elishakoff et al. und Erslan et al. eine Lösung darstellen.

5.5 AF-Software Entwicklungstrend

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die bisherigen Lösungen den STL-Datensatz der zu fertigenden Bauteile als gegeben voraussetzen. Auf die Leistungsfähigkeiten moderner 3D-CAD-Systeme wird daher bei der Prozessvorbereitung nur unzureichend zurückgegriffen. Die verfügbaren Lösungen sind jedoch schon sehr ausgereift, insbesondere gilt dies für die Stützkonstruktionsgenerierung und Schichtdatenerzeugung, hier kann demnach ein großes Erweiterungs- und Integrationspotenzial dieser Lösungen bezüglich der CAD-Umgebung festgestellt werden.

Diese Integrations- und Schnittstellenproblematik wird derzeit auch verstärkt von der Industrie wahrgenommen. So hat *Stratasys*, als einer der großen Anbieter für Lösungen zur additiven Fertigung, verstärkte Kooperation mit großen CAD-Systemanbietern, wie *PTC*, angekündigt [PTC14]. Auch *Autodesk* hat zuletzt mit der Ankündigung der *Spark*-Umgebung sein verstärktes Interesse für die Anwendung der additiven Fertigung verdeutlicht. Neben dem von Autodesk eigens entwickelten *Ember* Stereolithografie Systems wird die API der offenen *Spark*-Plattform den Anwendern verfügbar gemacht. So sollen auch Eigenentwicklungen im Bereich Software möglich sein [Au15].

6 Modellbildung und exemplarische Umsetzung

Als Grundlage für die Modellierung der jeweiligen Teillösungen wird eine modulare Vorgehensweise für die Integration in die CAD-CAM-Umgebung gewählt. Das in Abb. 6-1 gezeigte Paketdiagramm stellt die jeweiligen Module als Paket und die dazugehörigen Teillösungen als Unterpakete dar. Das Paketdiagramm aus Abb. 6-1 ist in dem zugrunde liegenden SysML-Modell als Unterdiagramm des Pakets „CAD-CAM-Software“ modelliert, welches im Paketdiagramm der gesamten Modellstruktur definiert wird (vgl. Abb. 3-9). Die entwickelte Lösung wird auf dieser Basis weiter als SysML-Modell ausdetailliert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aus Gründen der Übersichtlichkeit jedoch nicht auf alle Details und Verknüpfungen des entwickelten SysML-Modells eingegangen.

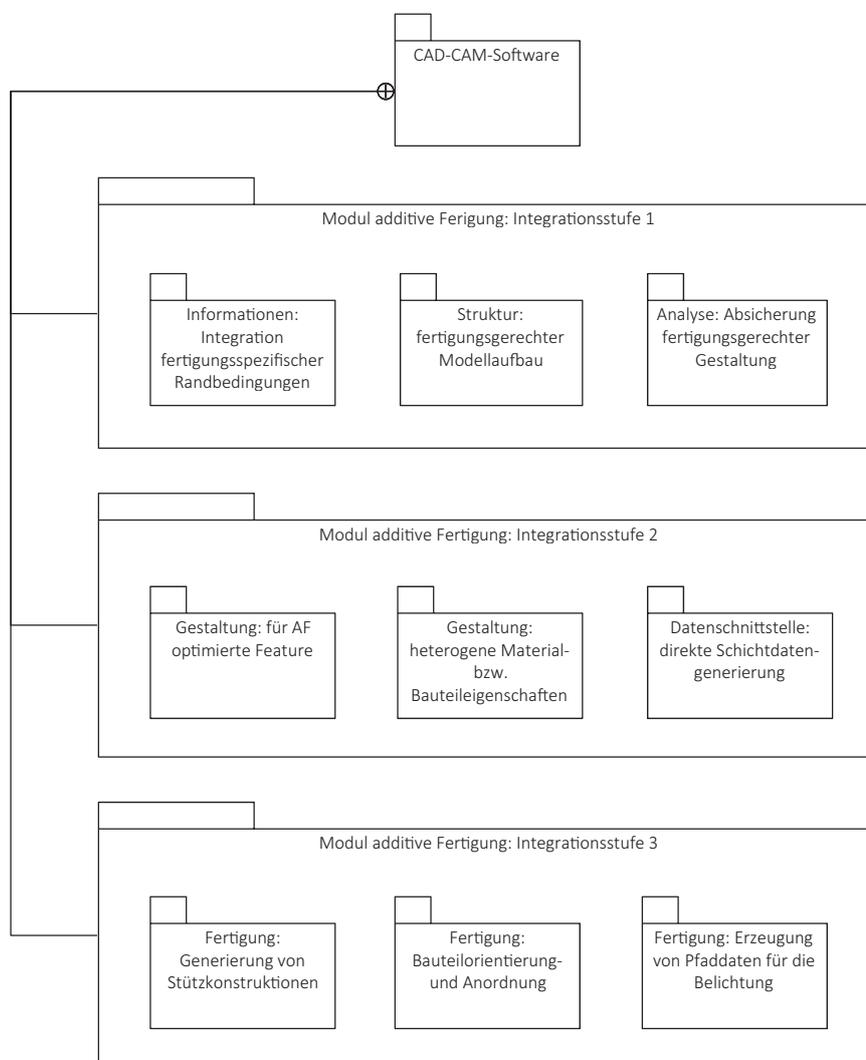


Abb. 6-1: Modulare Integration in der CAD-CAM-Umgebung als Paketdiagramm

Die modulare Vorgehensweise wurde gewählt, um eine nutzer- und anwendungsspezifische Lösung für das Gesamtproblem abbilden zu können. In drei Stufen erfolgt so eine immer umfassendere Integration der in Abschnitt 4.4 identifizierten Anwendungsfälle in eine CAD-CAM-Umgebung. Die höheren Integrationsstufen enthalten hierbei auch Lösungen aus den niedrigeren Stufen. Der modulare Aufbau soll gleichzeitig eine spezifische Anpassung ermöglichen.

Die erste Integrationsstufe unterstützt als Basis vor allem den Produktentwickler bei der AF-gerechten Bauteilgestaltung. Hierzu werden die dazugehörigen, in Abschnitt 4.4 beschriebenen, Anwendungsfälle für die weitere Modellierung genutzt. Das Ziel dieser Integrationsstufe ist vor allem, das bereits beim Fertigungstechnologen bekannte Wissen in den Produktentwicklungsprozess mit einfließen zu lassen. Vorhandene Analysewerkzeuge sollen so genutzt oder ergänzt werden, dass diese zur Analyse AF-spezifischer Eigenschaften genutzt werden können. Ebenfalls soll der Modellaufbau methodisch so strukturiert werden, dass die Durchführung von AF-bedingten Operationen, wie die Einstellung der Orientierung, möglich ist. Die Zuordnung der Anwendungsfälle zu den Unterpaketeten der ersten Integrationsstufe ist in Abb. 6-2 dargestellt.

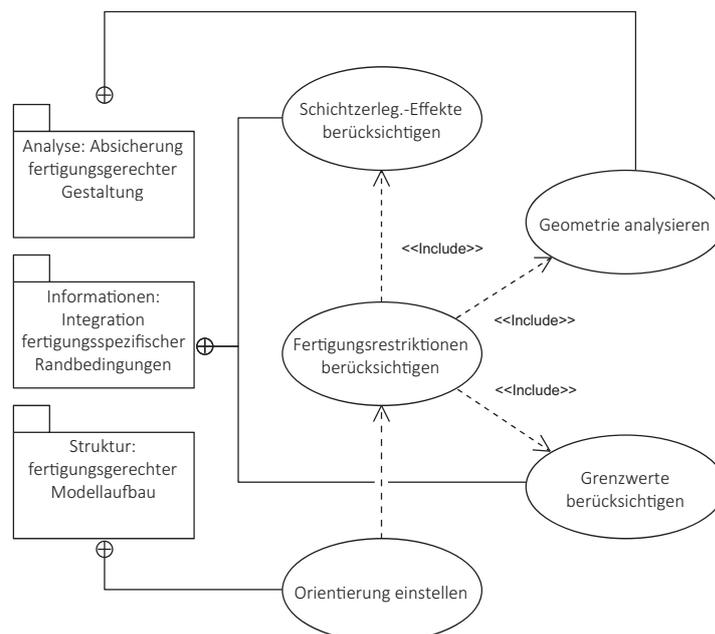


Abb. 6-2: In der ersten Integrationsstufe enthaltene Anwendungsfälle

Die zweite Integrationsstufe (Abb. 6-3) erweitert die vorhandene Modellierungsumgebung der CAD-Software vor allem im Hinblick auf AF-gerechte Features und die Möglichkeiten, heterogene Materialeigenschaften und Strukturen im Bauteil abbilden zu können. Wesentliches Leistungsmerkmal muss dann die Export- bzw. Importfunktion resultierender Schichtdaten sein, da sonst die Informationen zu bereichsweise verschiedenen Materialeigenschaften, Strukturen etc. nicht übergeben bzw. übernom-

men werden können. Die Herausforderung liegt hier also in der Entwicklung eines neuen oder in der Anpassung eines bestehenden Datenformats zur Übergabe von Schichtdaten. Ebenfalls müssen leistungsfähige Algorithmen zur Schichtdatengenerierung implementiert werden.

Die höchste Ausbaustufe wird mit der dritten Integrationsstufe erreicht (Abb. 6-3). Diese Integrationsstufe entspricht in ihrem Leistungsumfang voll integrierten CAD-CAM-Lösungen. Vergleichbar zu nennen ist hier z. B. die *PTC Creo Production Machining Extension* [PTC15]. Dabei wird die AF-Fertigungsmaschine so in der CAD-CAM-Umgebung integriert, dass direkt die Fertigungsparameter mit erfasst werden und Werkzeugwege (Pfaddaten) sowie Prozessparameter (Laserleistung, Scangeschwindigkeit etc.) beschrieben werden können. Ebenso werden die Anwendungsfälle der Orientierung, Verschachtelung und Stützkonstruktionen integriert.

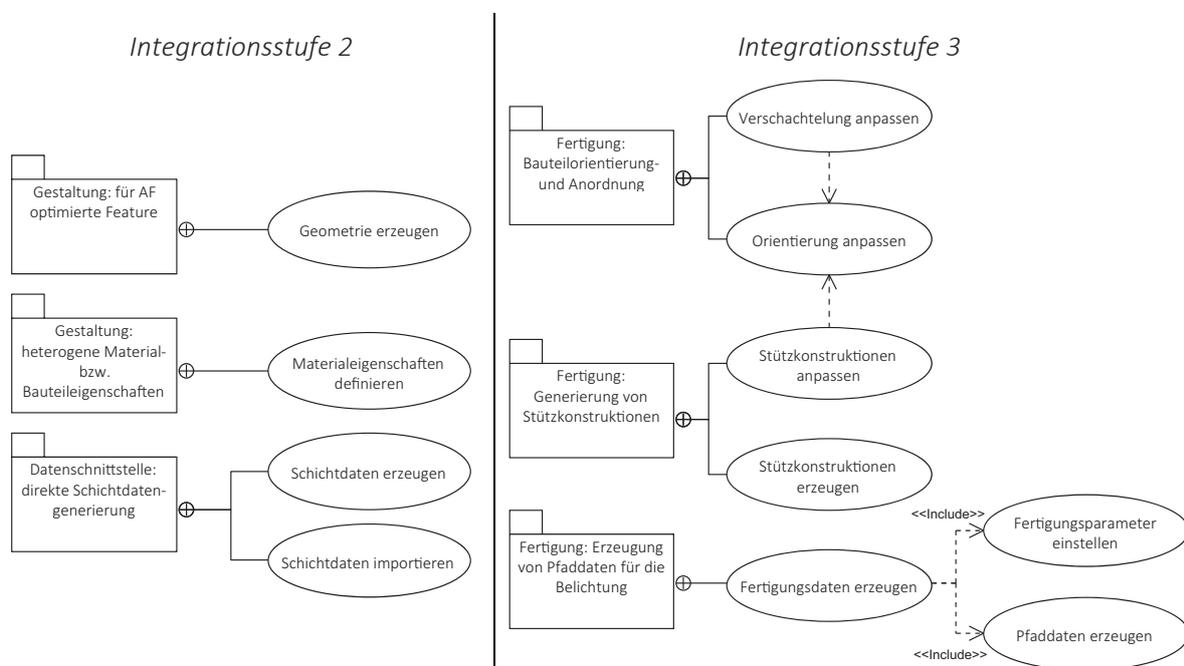


Abb. 6-3: In der zweiten und dritten Integrationsstufe enthaltene Anwendungsfälle

Die einzelnen Module und Integrationsstufen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Dazu werden sowohl anwendbare, bekannte Lösungen integriert als auch neue Ansätze zur Lösung der Teilprobleme vorgestellt. Für ausgewählte Teilprobleme erfolgt auch eine Beschreibung der exemplarischen Umsetzung.

6.1 Integrationsstufe 1

Die zuvor genannten Pakete der ersten Integrationsstufe lassen sich prinzipiell in zwei verschiedene Bereiche gliedern. Auf der einen Seite müssen die fertigungstechnischen Restriktionen erfasst und dargestellt werden. Auf der anderen Seite müssen die CAD-Modelle, basierend auf diesen Informationen, fertigungsgerecht aufgebaut werden.

Dazu sind zur Absicherung der fertigungsgerechten Gestaltung in der CAD-Umgebung Analysewerkzeuge zu integrieren.

Diesbezüglich wird zunächst ein System modelliert, welches eine Umsetzung der identifizierten Anwendungsfälle darstellt. Als übergeordnete Bezeichnung der entwickelten Lösung wird im Modell der System Block „Additive Manufacturing Tools“ (AMT) eingeführt. Dieser entspricht als Blackbox der Summe aller Lösungen, die als erste Integrationsstufe entwickelt werden. Für diese Ausbaustufe erhält das System die zwei Systembausteine (Blöcke) „Additive Manufacturing Parameters“ (AMP) und „Additive Manufacturing CAD Tool“ (AMC). Diese sollen den im vorherigen Absatz beschriebenen Bereichen entsprechen, d. h. der Block AMC beinhaltet Werkzeuge zur CAD-Integration, der Block AMP solche zur Erfassung von fertigungstechnischen Randbedingungen. Eine entsprechend gestaltete Schnittstelle erlaubt den Datenaustausch zwischen den einzelnen Systembausteinen. Diese Datenschnittstelle wird als AMP-XML bezeichnet. Das Blockdefinitionsdiagramm in Abb. 6-4 zeigt grob den modellierten Aufbau und die wesentlichen Schnittstellen. Als Erweiterung der STL-Schnittstelle wird in dieser Integrationsstufe auch bereits das AMF-Datenformat integriert. Datenschnittstellen werden in dem Modell als Ports mit Flusseigenschaften (engl. flow ports) abgebildet.

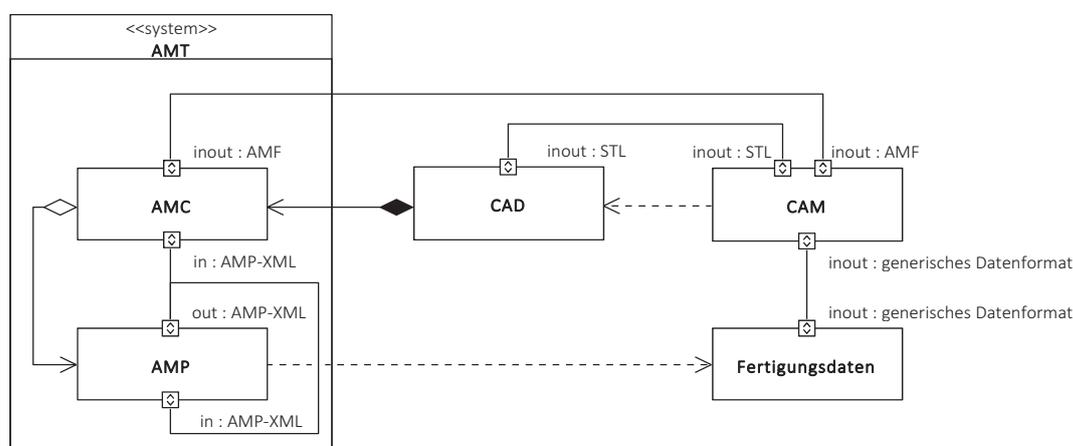


Abb. 6-4: Blockdefinitionsdiagramm der ersten Integrationsstufe

Das Gesamtsystem soll dabei so aufgebaut werden, dass die in AMC verfügbaren Werkzeuge in die CAD-Umgebung integriert werden. Dies ist über die Kompositionsbeziehung zwischen den Systembausteinen CAD und AMC modelliert. Die Werkzeuge zur Erfassung und Wiedergabe der fertigungstechnischen Restriktionen sind als Aggregation von AMC definiert. So können diese auch als eigenständige Lösung ohne das CAD-System genutzt werden. Das in Abb. 6-5 gezeigte Anforderungsdiagramm zeigt in diesem Zusammenhang, wie die zu Beginn dieser Arbeit ermittelten übergeordneten Anforderungen von den jetzt definierten Systembausteinen erfüllt werden. Dabei werden die Anforderungen zur Prüfung der Bauteilgestalt sowie zur Berücksichtigung von

fertigungstechnischen Randbedingungen von der ersten Integrationsstufe erfüllt. Dabei müssen alle Entwicklungen auch den *SQuaRE*-Anforderungen genügen.

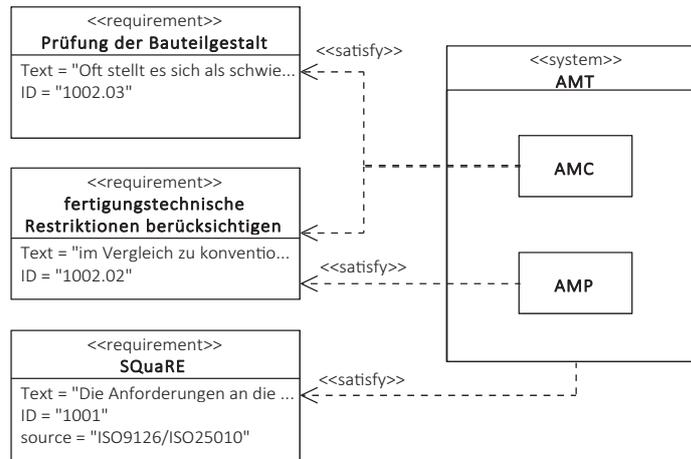


Abb. 6-5: Zuordnung der Anforderungen an die erste Integrationsstufe

6.1.1 Identifikation von fertigungstechnischen Randbedingungen

Die Integration der fertigungstechnischen Randbedingungen wird in dem Modell von dem Anwendungsfall „Fertigungsrestriktionen berücksichtigen“ abgebildet (vgl. Abb. 6-2). Die Herausforderung ist zunächst, die entsprechenden Randbedingungen zu identifizieren. Dazu wurde eine expertenbasierte Vorgehensweise gewählt. Im Rahmen des an der Universität Duisburg-Essen durchgeführten Forschungsprojekts „*Wissensbasiertes Unterstützungssystem für Rapid Manufacturing 3D-CAD-CAM Prozesse*“ wurden die Randbedingungen in dem projektbegleitenden Ausschuss erarbeitet [KöWi14]. Am Ausschuss beteiligt waren neben den Projektpartnern Rapid Technology Center (RTC) des Lehrstuhls für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen und der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V. (GFAI) verschiedene Teilnehmer aus Industrie und Forschung. Unter anderem waren dies namhafte Anlagen- und Softwarehersteller der Branche. Ebenfalls beteiligt waren Unternehmen, die AF bereits für die Produktherstellung einsetzen.

Basierend auf den im Ausschuss geführten Diskussionen können so wesentliche Einflussfaktoren beschrieben werden. Diese Einflussfaktoren sind in dem Modell als Anforderungen des Anwendungsfalls „Fertigungsrestriktionen berücksichtigen“ integriert. In diesem Rahmen können die zuvor in Kapitel 4 systematisierten Anforderungen für diesen Fall um 60 detaillierte Anforderungen ergänzt werden. Die hier formulierten Anforderungen sind derart im Modell integriert, dass diese direkt die Funktion einer zu gestaltenden Softwarelösung zur Erfassung und Darstellung der fertigungstechnisch relevanten Prozessparameter beschreiben. Im Verlauf dieser Arbeit wird nicht auf jede der Anforderungen im Detail eingegangen, da die nachfolgende Beschreibung der exemplarischen Umsetzung die entsprechenden Punkte ebenfalls

erläutert. Die Abb. 6-6 zeigt exemplarisch die Verschachtelung der zusätzlichen Anforderungen, ergänzt um eine der Anforderungen im Detail.

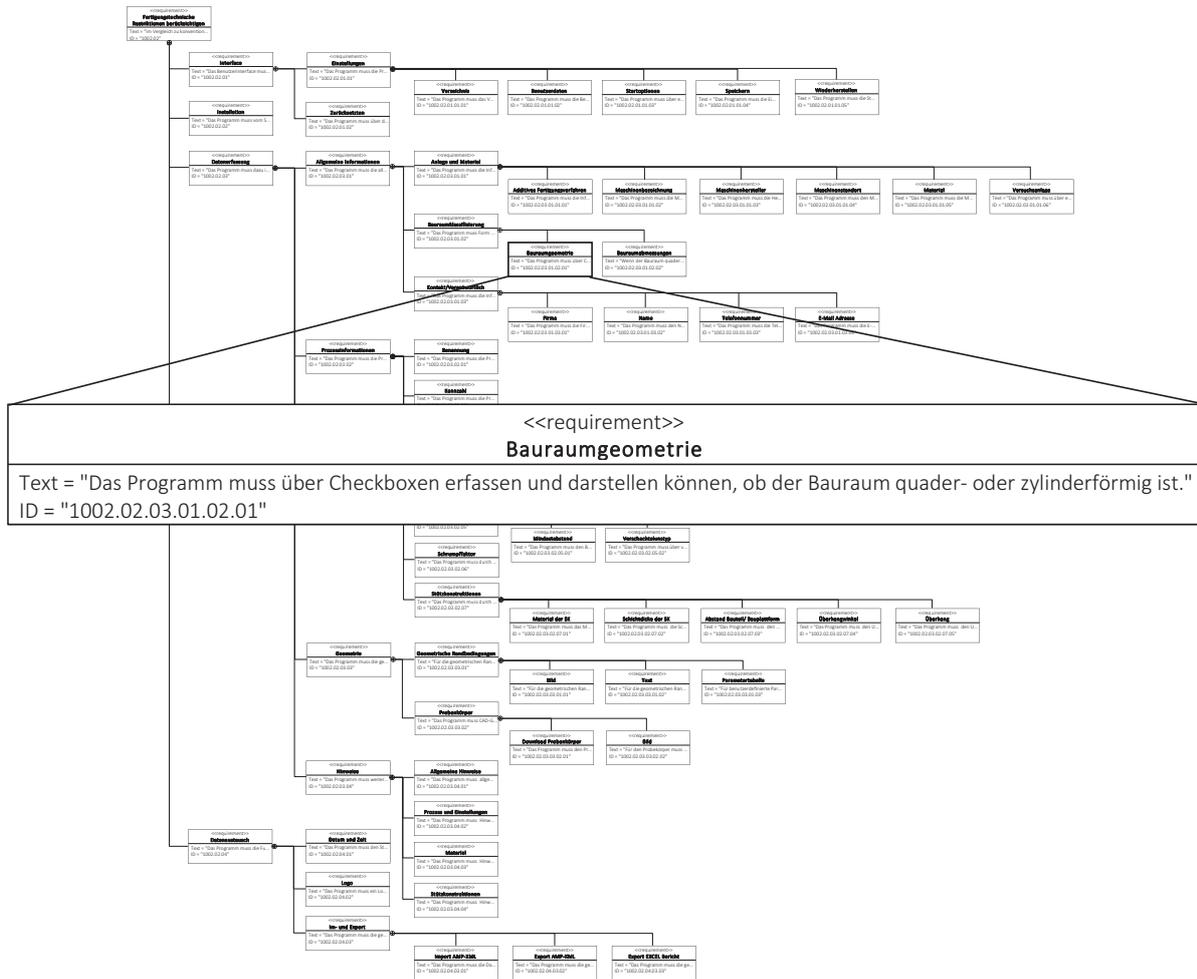


Abb. 6-6: Detaillierung der Anforderungen zur Funktionsbeschreibung

6.1.2 Konzept zum Datenaustausch

Ein kritischer Punkt bei der Konzeptentwicklung ist die Frage des Datenaustauschs. Dazu ist es sinnvoll, die beteiligten Personen, Programme und Anwendungsfälle im Zusammenhang zu betrachten und so Schnittstellen zu identifizieren. Das in Abb. 6-7 gezeigte Anwendungsfalldiagramm stellt dies in übersichtlicher Form dar.

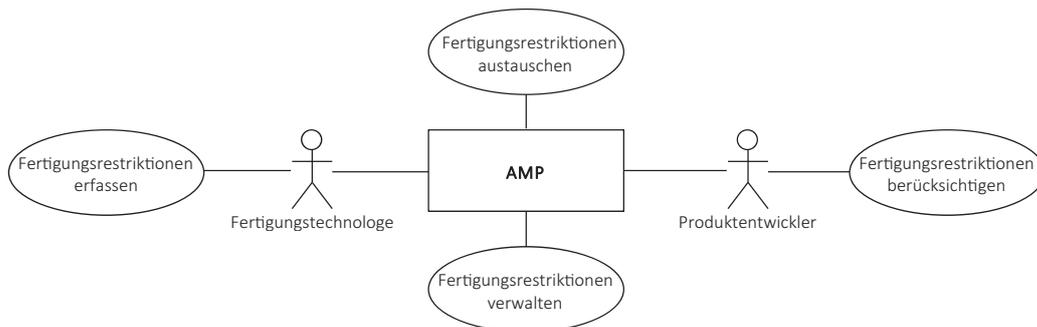


Abb. 6-7: Anwendungsfalldiagramm zur Nutzung von AMP

In Kombination mit der in Abb. 6-4 definierten Architektur wird so der Bedarf eines Datenaustauschformats definiert:

Wie kann der Datenaustausch so gestaltet werden, dass benutzerübergreifend wesentliche fertigungsbedingte Informationen übergeben werden können?

Auch wenn beide Diagramme suggerieren, dass es sich um eine geschlossene Softwarelösung handelt, ist der Bedarf zum Austausch der gesammelten Parameter gegeben. Es kann, insbesondere bei der derzeitigen Struktur der Branche, nicht davon ausgegangen werden, dass Fertigung und Produktentwicklung in einem Haus stattfinden und so der Zugriff auf dieselben Daten gewährleistet ist. Aus diesem Grund ist eine datenbankbasierte Lösung zunächst durch eine einfache Lösung zum Datenaustausch zu substituieren, da Fertigungstechnologie und Konstrukteur zwar dieselbe Software nutzen, üblicherweise jedoch an unterschiedlichen Standorten.

Die Idee hinter dieser Vorgehensweise ist, dass es zunächst einfacher ist, eine Datei mit den von dem Programm definierten Parametern auszutauschen, statt ein firmen- oder unternehmensbereichsübergreifendes Datenbanksystem aufzubauen und zu pflegen. Zukünftig kann über eine cloudbasierte Lösung nachgedacht werden. Für den Rahmen dieser Arbeit wird der Aufbau einer solchen Lösung jedoch als unverhältnismäßig aufwendig bewertet.

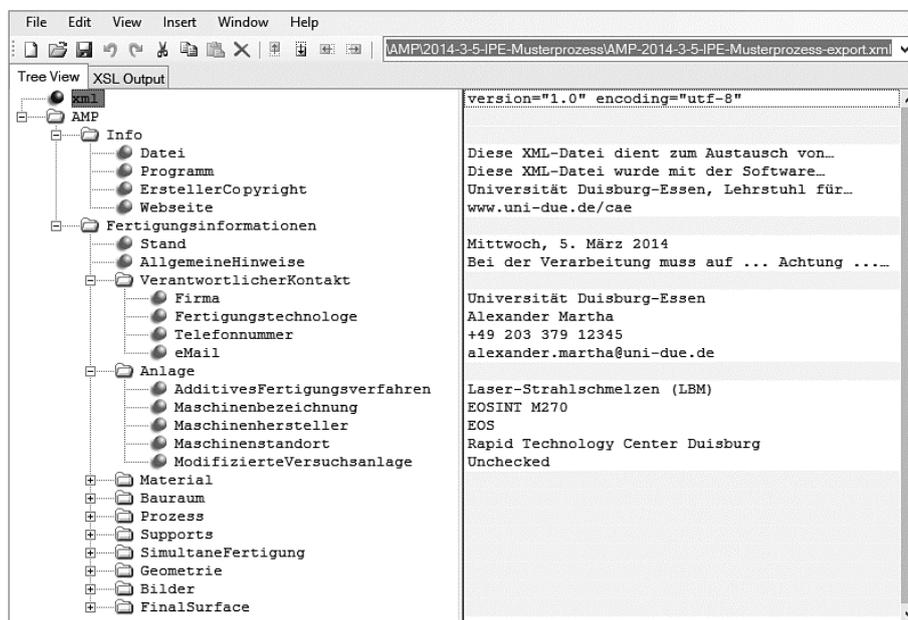


Abb. 6-8: AMP-XML im XML-Notepad

Somit werden die von dem Programm erfassten Parameter in einer XML-Datei strukturiert gespeichert (AMP-XML). Der Vorteil von XML-Dateien ist, dass diese nicht nur gut maschinell verarbeitet werden können, sondern durch die ASCII-Kodierung auch menschenlesbar sind. Daher können die mit dem Programm gesammelten Daten auch von weiteren Applikationen genutzt werden. Ist keine entsprechende Applikation

vorhanden, können die Daten mit einem einfachen Text- oder XML-Editor²⁰ ausgelesen werden (siehe Abb. 6-8).

Die Strukturierung der XML-Datei erfolgt dabei größtenteils analog zu der Struktur der erfassten Anforderungen. In der Abb. 6-8 sind die übergeordneten Elemente dargestellt. Das Hauptelement „AMP“ enthält dementsprechend alle fertigungstechnisch relevanten Daten in dem Element „Fertigungsinformationen“. Verschachtelte Elemente enthalten die eingepflegten Informationen und Parameter. Informationen zu der verwendeten Programmversion etc. sind in dem zusätzlichen Element „Info“ beinhaltet.

Der Import und Export von XML-basierten Daten ist ebenfalls gut umsetzbar. Durch verfügbare Prozeduren und Funktionen können so die enthaltenen Daten einfach verarbeitet werden. So ist es für den hier vorgesehenen Fall möglich, die in Formularfeldern gesammelten Informationen zu exportieren bzw. die Werte aus einer zu importierenden AMP-XML-Datei wieder in Formularfelder zu übertragen oder anders weiterzuverarbeiten. Umgesetzt werden die genutzten Funktionen in diesem Fall von dem System.Xml-Namespace²¹, das eine auf Standards aufbauende Unterstützung für die XML-Verarbeitung bereitstellt. Weitere detaillierte Informationen zur programmiertechnischen Implementierung sind im *Microsoft Developer Network (MSDN)*²² dokumentiert.

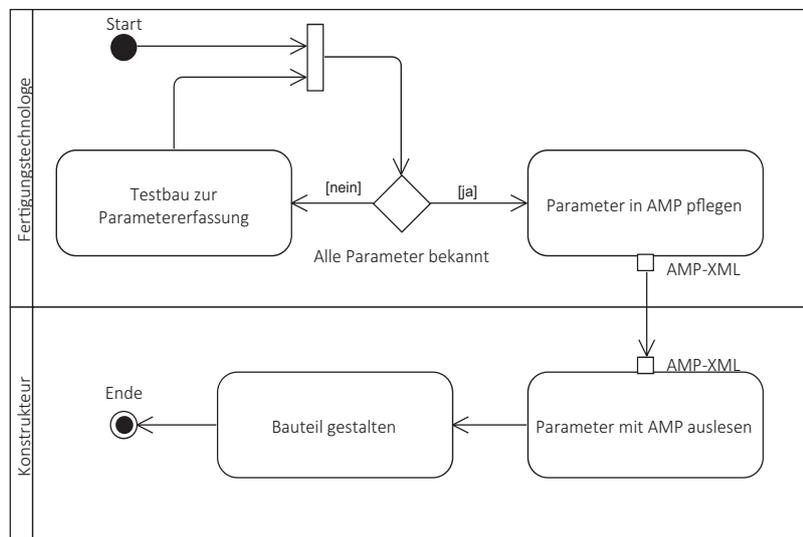


Abb. 6-9: Datenaustausch mit AMP-XML

Das Aktivitätsdiagramm in Abb. 6-9 zeigt schematisch die Verwendung von AMP-XML im Produktentwicklungsprozess. Der Fertigungstechnologe nutzt das Programm AMP dazu, die fertigungstechnisch relevanten Informationen in AMP zu pflegen. Lie-

²⁰ z. B. Microsoft XML-Notepad. WWW: <http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=7973>

²¹ WWW: <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/System.Xml%28v=vs.110%29.aspx>

²² WWW: <https://msdn.microsoft.com/>

gen noch nicht alle notwendigen Informationen vor, müssen diese durch Testbauten verifiziert werden. Ist ein Parametersatz vollständig gepflegt, kann dieser an den Konstrukteur übergeben werden. Dieser liest die Daten wiederum mit AMP aus, und kann so relevante Informationen bei der Produktgestaltung berücksichtigen. Durch eine direkte Integration von AMP und AMC sind diese Informationen auch in der 3D-CAD-Umgebung verfügbar, sodass keine umständliche und zeitaufwendige Informationsbeschaffung mehr notwendig ist.

Neben der XML-basierten Vorgehensweise wird auch eine dokumentenbasierte Alternative entwickelt. Insbesondere für den Fall, dass AMP nicht an allen beteiligten Stellen des Produktentwicklungsprozesses verfügbar ist, können die mit AMP erfassten Daten auch als *Microsoft EXCEL*-Datei bzw. als PDF exportiert werden. Vorlage für diese Funktion sind WPS-Schweißanweisungen (engl. Welding Procedure Specification). Ziel ist es, alle wichtigen Prozessparameter in übersichtlicher Form darzustellen. So können die Informationen auch zur Dokumentation in der Qualitätssicherung oder in Papierform am Arbeitsplatz verwertet werden. Umgesetzt wird dies durch den Export der Parameter aus den Formularfeldern des Programms in eine *Microsoft EXCEL*-Vorlagedatei. Die Datei ist so formatiert, dass direkt ein Druck im DIN-A4-Format oder als PDF erfolgen kann. Der Musterausdruck eines Berichts ist im Anhang in Abb. 8-10 und Abb. 8-11 dargestellt.

6.1.3 Fertigungsgerechter Modellaufbau

Um die Modelle fertigungsgerecht aufzubauen, muss zunächst der Begriff „fertigungsgerechter Modellaufbau“ im Kontext der additiven Fertigung präzisiert werden. Dies erfolgt durch die Beantwortung der Frage:

Wie können CAD-Modelle für die AF so aufgebaut werden, dass notwendige fertigungsbezogene Operationen auf der CAD-Seite umgesetzt werden können?

Fertigungsbezogene Operationen sind insbesondere die Neuorientierung und die Skalierung des CAD-Modells sowie die Unterdrückung spezifischer Elemente als auch die Exportfähigkeit in eine tesselierte Repräsentation.

Somit muss die entwickelte Lösung den Konstrukteur bei der CAD-Modellierung so unterstützen, dass die o. g. Operationen zu jeder Zeit erfolgen können. Dies bedingt als erstes einen „stabilen“ Modellaufbau. Es ist sicherzustellen, dass der Produktentwickler in diesem Fall über ein fundiertes Wissen bezüglich seines CAD-Systems und den CAD-Modellaufbau verfügt. Denn anders als z. B. bei der konventionellen Fertigung üblich, sind die exportierten CAD-Daten hier auch direkt die Fertigungsdaten. Sprich „schlechte“ CAD-Modelle führen zu aufwendiger Nacharbeit oder sogar zu Fehlern. In diesem Kontext sind umfassende Schulungen des CAD-Anwenders besonders erforder-

derlich. Unterstützt wird dies durch die verfügbare Fachliteratur, z. B. [Kö02], [StRi12], [Kl15].

Ohne an dieser Stelle zu sehr ins Detail zu gehen, können die folgenden wesentlichen Grundsätze festgehalten werden, die unabhängig vom verwendeten 3D-CAD-System eine gute Modellqualität sicherstellen:

- *Differenzierung von Grob- und Feingestaltung:* Der Modellaufbau ist in die Grobgestaltung und die Feingestaltung des Modells zu untergliedern. Als Grobgestalt werden die wesentlichen, gestaltbestimmenden Elemente bezeichnet. Feingestaltung beschreibt die Modelldetails, wie Nuten, Fasen, Rundungen und kosmetische Elemente. Ziel ist es das Modell erst grob zu gestalten und am Ende Details aufzuprägen. In diesem Zuge gilt auch der nächste Grundsatz:
- *Möglichst einfache Skizzen durch featurebasierte Modellierung:* Details, wie Bohrungen, Fasen oder Rundungen, sind besser als einzelne Features vorzusehen als in Skizzen grobgestalteter Elemente. Ansonsten drohen „überladene Skizzen“. Dies führt zu unübersichtlichen Modellen und erschwert die Änderbarkeit. Das Wegnehmen bzw. Unterdrücken nicht benötigter Details wird ebenfalls unnötig erschwert. In Abb. 6-10 ist beispielhaft gegenübergestellt, wie durch Differenzierung von Grob- und Feingestaltung sowie durch einfache Skizzen (Querschnitte) eine übersichtliche und stabile Modellierungsreihenfolge gewählt werden kann. Auch wenn das Ergebnis gleich aussieht, ist in dem als „gut“ gekennzeichneten Fall die Anpassung einzelner Details einfacher möglich. Im „schlechten“ Fall muss für Änderungen die Ursprungsskizze editiert werden, was bei komplexen Bauteilen zu Modellinstabilität führen kann.

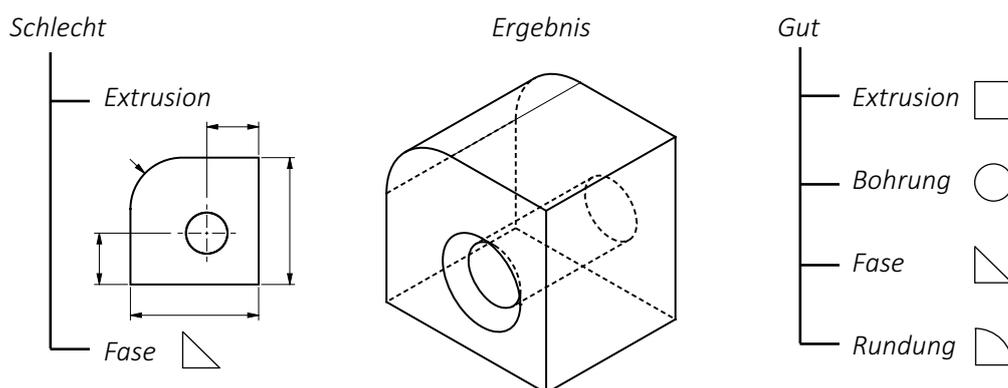


Abb. 6-10: Differenzierung von Grob- und Feingestaltung

- *Bedachte Referenzierung:* bei der Erstellung von Modellen in parametrischen 3D-CAD-Systemen führen unbedachte Referenzen zu unstabilen Modellen. Insbesondere bei Änderungen sind ungewollte Eltern-Kind-Beziehungen problematisch. Erfolgt der Modellaufbau strukturiert und mit bedachter Referenzierung sind auch komplexe Folgeoperationen am Gesamtmodell gut möglich. Dies schließt z. B. die

Neuorientierung oder Skalierung mit ein. Empfehlenswert ist es hier, globale übergeordnete Referenzen zu nutzen. Diese können z. B. in einem Skelettmodell bereitgestellt werden.

- *Reduzierung der Komplexität einzelner Elemente:* Wird die Komplexität einzelner Modellelemente reduziert, sind die Modelle besser nachvollziehbar. Die spätere Modellanpassung wird so erleichtert und Fehler durch Fehlinterpretation bzw. Suchzeiten werden reduziert. Auch wenn diese Vorgehensweise in einem umfassenderen Modellbaum durch Erhöhung der Elementanzahl resultiert, kann so z. B. auch die Konstruktionsabsicht besser dokumentiert werden, indem einzelne Funktionen jeweils als Einzelement abgebildet werden. Durch eine nachvollziehbare Gliederung des Modellbaums in Gruppen bzw. Ordnen wird die Übersichtlichkeit bei großer Elementzahl unterstützt.
- *Verschmelzung der Elemente:* Dieser Punkt gilt insbesondere für die additive Fertigung. Für einen stabilen Datenexport sind Modelle erforderlich, die fehlerfrei zu einem Volumenelement verschmolzen wurden. Üblicherweise geschieht dies automatisch bei der Modellierung der einzelnen Elemente. Werden jedoch Techniken der Flächenmodellierung o. ä. genutzt, ist unbedingt darauf zu achten, dass am Ende ein geschlossenes Volumen bereitgestellt wird. In der Fachliteratur werden Modelle, die diese Anforderung erfüllen, oft als „wasserdicht“ bezeichnet [Ge13].
- *Anpassung der Modellgenauigkeit:* Die Modellgenauigkeit²³ muss an die Vernetzung angepasst werden. Ansonsten kann es in Kombination von gewählter Genauigkeit und Vernetzungsgenauigkeit beim Export zu Fehlern, wie z. B. Lücken oder Überlappungen einzelner Facetten, kommen. Die Modell- und Vernetzungsgenauigkeiten müssen so abgestimmt werden, dass diese absolut über der Genauigkeit der verwendeten Anlage liegen. Ist die Genauigkeit der Anlage z. B. 0,1 mm sollte die absolute Modellgenauigkeit (die kleinste zulässige Größe der Einheit, die von dem CAD-Programm fehlerfrei angezeigt oder interpretiert werden kann) mindestens 0,01 mm betragen. Zu feine Auflösungen sind wiederum Fehlerursache und daher ebenfalls zu vermeiden. Eine formalisierte Aussage dieses Zusammenhangs kann hier nicht definiert werden und ist im Einzelfall wie folgt schrittweise abzustimmen:
 1. *Genauigkeit der verwendeten Anlage bzw. gewünschte Bauteilgenauigkeit identifizieren,*
 2. *Erforderliche Vernetzungsgenauigkeit der STL-Datei ableiten,*
 3. *Modellgenauigkeit an die geforderte Vernetzungsgenauigkeit anpassen.*

²³ Modellgenauigkeit: „[...] Granularität oder Präzision, mit der die Software die Geometrie erzeugt. Die Modellgenauigkeit bestimmt z. B. Eigenschaften, wie den Feinheitsgrad, mit dem die Software die Tessellierung der Modellkurven durchführt. [...]“, PTC 2015. WWW: http://help.PTC.com/Creo_hc/Creo30_sim_hc/german/index.html#page/sim/simulate/getstart/getstart/reference/tolerance_accuracy.html

Tabelle 1 zeigt als Beispiel, welche Auswirkung die Änderung der Modellgenauigkeit auf die letztliche Teilegenauigkeit hat. Referenz ist eine Kugel mit 100 mm Durchmesser. Es wurden daraus zwei STL-Dateien in feinst möglicher STL-Genauigkeit exportiert, wobei zuvor die absolute Modellgenauigkeiten von 0,1 mm und im Vergleich von 0,01 mm für das CAD-Modell gewählt wurden. Auch wenn die Volumenabweichung mit 0,63 % bzw. 0,07 % marginal erscheint, kann der Zusammenhang zwischen Modellgenauigkeit und Volumenfehler nachgewiesen werden. Da z. B. durch die Schichtzerlegung eine Verstärkung dieser Effekte erfolgen kann, ist es ratsam, die Modellgenauigkeit nicht unbeachtet zu lassen.

Tabelle 1: Auswirkungen von Änderungen der Modellgenauigkeit

<i>Abs. Genauigkeit</i>	<i>Facetten</i>	<i>Volumen</i>	<i>Volumen-Abweichung</i>	
<i>Referenzmodell</i>	0	523599 mm ³	-	-
0,1 mm	2496	520303 mm ³	-3296 mm ³	-0,63 %
0,01 mm	24960	523260 mm ³	-339 mm ³	-0,07 %

Werden die genannten Punkte beim Modellaufbau berücksichtigt, können viele modellierungsbedingte Fehler minimiert werden. Das Aktivitätsdiagramm in Abb. 6-11 verdeutlicht die vorgesehene Vorgehensweise bei der Modellierung. Werden die als Aktivitäten modellierten Schritte so durchgeführt, kann ein stabiles, regenerierbares Modell erzeugt werden.

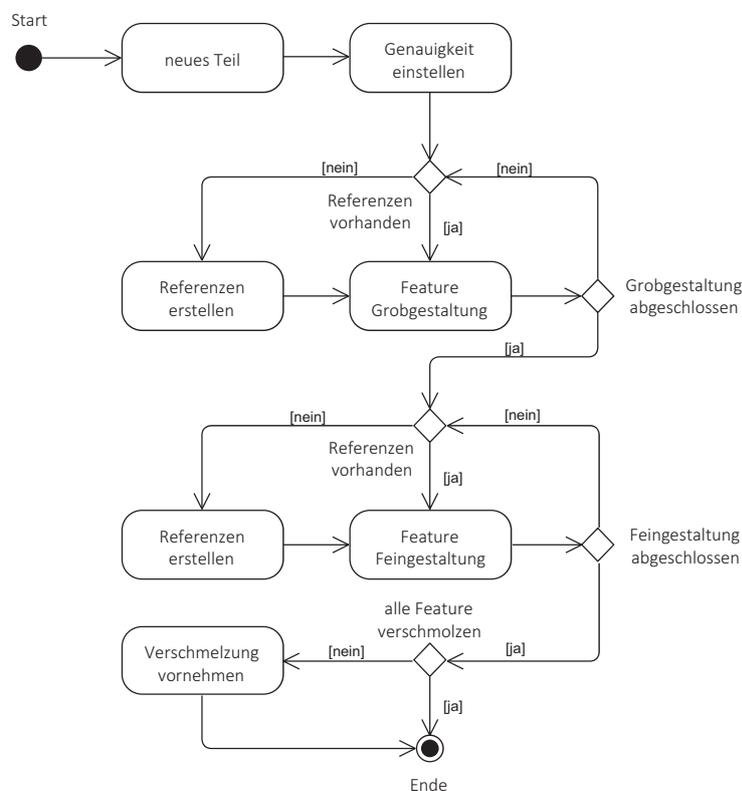


Abb. 6-11: Modellierungsmethodik als Aktivitätsdiagramm

Zukünftig kann eine Anpassung der Methodik dahingehend erfolgen, dass moderne 3D-CAD-Systeme immer mehr die Fähigkeit aufweisen, auch historienfreie, sogenannte direkte Modellierung anzuwenden. Die Methoden zur klassischen featurebasierten Konstruktion sind hier nicht umfassend anwendbar. In dem hier betrachteten Anwendungsfall aus dem Umfeld des Maschinen- und Anlagenbaus ist der umfassende Nutzen direkter Modellierungstechnologie jedoch zunächst noch nicht erkennbar. Daher erfolgt an dieser Stelle keine tiefergehende Betrachtung.

6.1.4 Absicherung der fertigungsgerechten Gestaltung

Die fertigungsgerechte Gestaltung unterscheidet sich vom fertigungsgerechten Modellaufbau dahingehend, dass die Ausgestaltung der Geometrie und nicht die Modellqualität fokussiert werden. Somit ergibt sich die Fragestellung:

Wie können Bauteile für die additive Fertigung so gestaltet werden, dass anschließend eine anforderungsgerechte Bauteilherstellung erfolgen kann?

Diese Fragestellung zielt, im Vergleich zu jener aus dem vorherigen Abschnitt 6.1.3 mehr in Richtung Konstruktionsregeln als auf die Modellierungsmethodik ab. Konstruktionsregeln sind stark verfahrensabhängig und können nur schwer für mehrere additive Fertigungsverfahren vereinheitlicht werden. Verfahrensspezifisch sind so verschiedene Ansätze bekannt, die Konstruktionsregeln dokumentieren. Neben der VDI Richtlinie 3405-3 „*Konstruktionsregeln für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*“ sind Lösungen z. B. von Hague [HaMa04], Thomas [Th09], Wegner [WeWi12], Breuninger [Br13] und Adam [Ad15] bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit soll gezeigt werden, mit welchen Werkzeugen moderner 3D-CAD-Systeme die in der Literatur beschriebenen Konstruktionsregeln abgesichert werden können.

- *Abmessungen des Bauteils:* Der Bauraum additiver Fertigungsanlagen ist begrenzt. Übliche Bauräume bewegen sich in der Größenordnung eines Würfels mit 250 mm Kantenlänge (Stand 2015). Somit muss bei der Gestaltung der Bauteile berücksichtigt werden, dass bei größeren Teilen Fügestellen vorgesehen sind. Bei der Gestaltung solcher formschlüssiger Verbindungen kann direkt die Fähigkeit additiver Verfahren genutzt werden, komplexe Geometrie herzustellen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, den zur Verfügung stehenden Bauraum im Modell, z. B. in Form einer 3D-Skizze oder eines Skelettmodells, zu hinterlegen. Berücksichtigt werden muss an dieser Stelle, dass verfahrensbedingt das Bauteil nach der Fertigung Schrumpf aufweisen kann. Dieser fällt in Baurichtung ggf. anders aus als orthogonal zur Bauichtung. Somit kann üblicherweise nicht der maximal verfügbare Bauraum, sondern eine kleinere Variante mit Schrumpfberücksichtigung genutzt werden. Der Schrumpf muss vorher prozessabhängig erfasst werden. Die Abmessungen des Bauteils können während der Gestaltung durch entsprechende Analysewerkzeuge

der CAD-Systeme ermittelt werden. Üblicherweise wird die Gesamtabmessung des Bauteils über eine quaderförmige Boundingbox abgefragt (vgl. Abb. 6-12). Darüber hinaus stehen i. d. R. Werkzeuge zur Längenmessung etc. zur Verfügung. Ist dies nicht der Fall, können mittels API-Programmierung oder Makrofunktionen Werkzeuge zur Erfassung der Bauteilabmessungen programmiert werden.

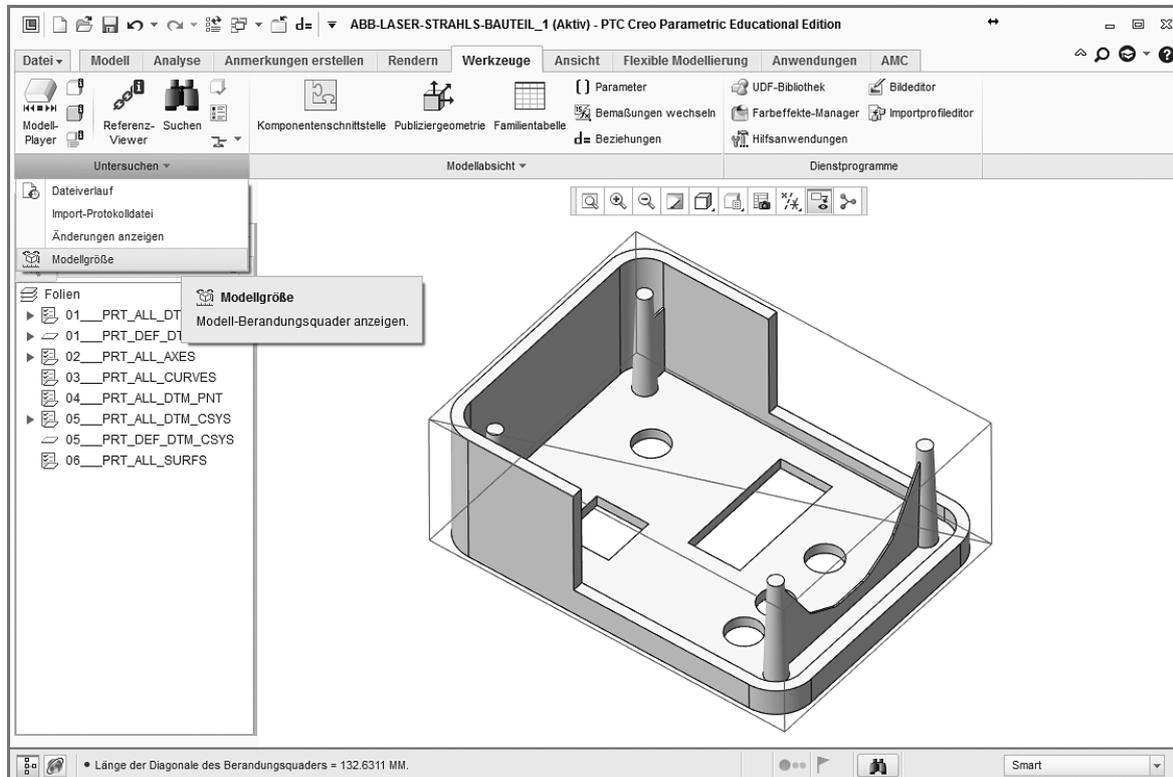


Abb. 6-12 Ermittlung der Bauteilabmessungen mit *PTC Creo 3.0*

- Minimalabmessungen einzelner Elemente:* Neben der makroskopischen Berücksichtigung maximaler Außenmaße ist vor allem die mikroskopische Auslegung einzelner Elemente ausschlaggebend. So sind beispielsweise die Wandstärken in ihrer Abbildbarkeit begrenzt oder Bohrungen dürfen ein Minimalmaß nicht unterschreiten, da diese sonst prozessbedingt durch Pulveranhaftungen oder Ungenauigkeiten verschlossen werden. Diese Grenzwerte müssen dem Konstrukteur bei der Gestaltung der CAD-Modelle zur Verfügung stehen. Da es nicht immer trivial ist, Minimalabmessungen bei der Featuredefinition umfassend zu erkennen, müssen konstruktionsbegleitend Analysewerkzeuge eingesetzt werden. Es können Werkzeuge zur Dickenprüfung genutzt werden, um die Geometrie hinsichtlich auftretender Maximal- und Minimalwandstärken zu prüfen. So können unnötige Materialanhäufungen oder nicht abbildbare dünne Wände ausgeschlossen werden. In Abb. 6-13 ist exemplarisch dargestellt, wie eine 3D-Wanddickenprüfung in der CAD-Umgebung erfolgen kann. Das Analysewerkzeug kennzeichnet die Bereiche, in denen die minimale Wandstärke unterschritten bzw. die maximale Wandstärke überschritten wird. Weitere Werkzeuge, die in diesem Kontext genutzt werden

können, sind die Ermittlung von kurzen Kanten und minimalen Radien im Modell, die ein Indiz für kleine Elemente darstellen. Alternativ kann die Krümmung analysiert werden, um über den Kehrwert der Minimalkrümmung des Bauteils zu prüfen, ob der Minimalradius unterschritten wird. Es können auch die einfachen Werkzeuge zur Längen- bzw. Radiusmessung eingesetzt werden, um o. g. Punkte zu prüfen. Dies gestaltet sich jedoch aufwendiger und setzt voraus, dass der Benutzer schon weiß, wo er prüfen muss.

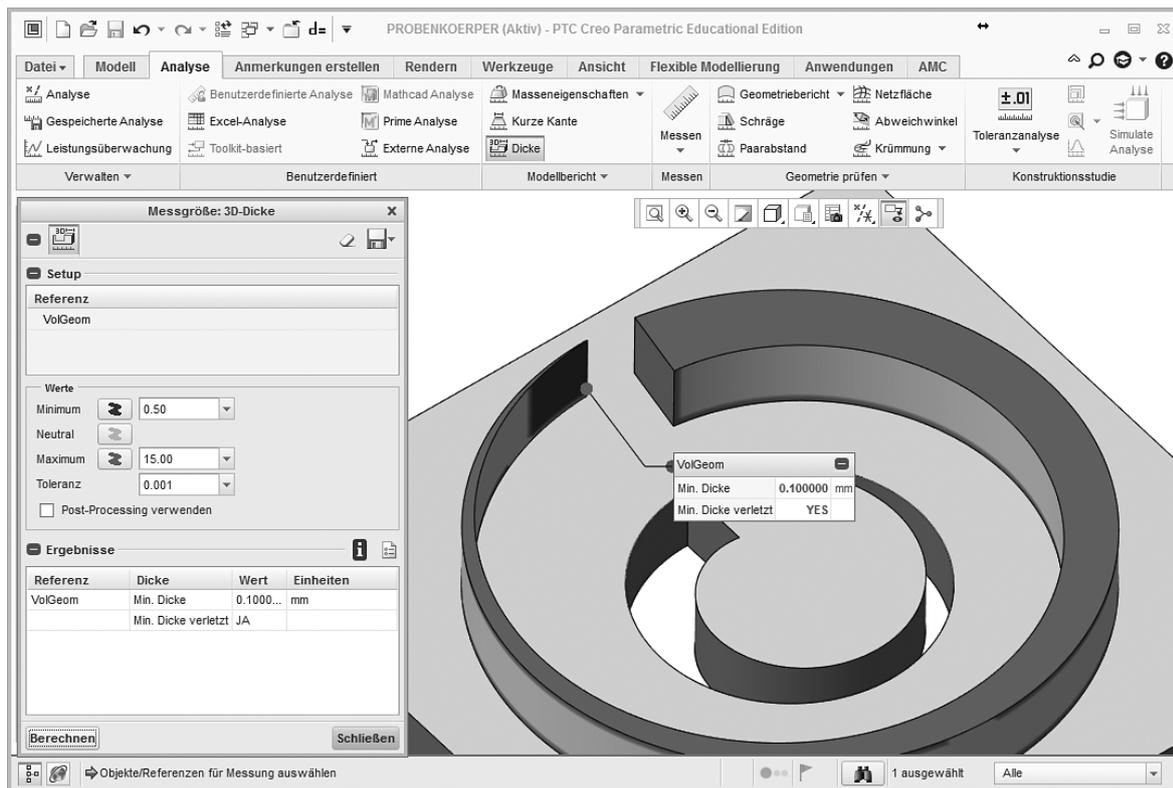


Abb. 6-13 3D-Wanddickenprüfung mit *PTC Creo 3.0*

- Materialeigenschaften und Richtungsabhängigkeit:* Additive Fertigungsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass sich Materialeigenschaften richtungsabhängig ausprägen. Vor allem in Baurichtung liegen andere Materialeigenschaften vor, als z. B. orthogonal dazu. Es macht daher Sinn, diese Effekte bei der Konstruktion zu berücksichtigen. Daher gibt der Konstrukteur optimalerweise die Baurichtung vor, so können die richtungsabhängigen Materialeigenschaften bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Dazu müssen diese jedoch auch so formuliert sein, dass der Konstrukteur diese bei der Gestaltung berücksichtigen kann, um so die Bauteile belastungsgerecht zu definieren. Ein Grundsatz ist hier die Vermeidung von großen Querschnittsprüngen in Baurichtung. Über entsprechende Werkzeuge können CAD-Systeme die Querschnittsflächen von Bauteilschnitten berechnen. So kann mit der Hilfe von Schnittebenen bereichsweise geprüft werden, wie sich der Querschnitt ändert. Sind Schwachstellen identifiziert, können diese durch Umgestaltung optimiert werden.

- Stützkonstruktionen:* Stützkonstruktionen sind wesentlicher Bestandteil vieler additiver Fertigungsverfahren. In diesen Fällen sind die notwendigen Stützkonstruktionen unbedingt bei der Gestaltung zu berücksichtigen, um diese durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Diese Maßnahmen schließen insbesondere die Neigung von Bauteilflächen mit ein. Ab einem bestimmten Überhang bzw. Überhangwinkel sind Stützkonstruktionen erforderlich. Werden die Flächen jedoch in Bezug auf die Baurichtung steiler ausgeführt, kann ggf. auf die Stützkonstruktionen verzichtet werden. Hier sind insbesondere die Analysewerkzeuge zur Bestimmung von Schrägen bzw. Neigungswinkeln hilfreich. Berücksichtigt werden muss auch, dass die Stützkonstruktionen nach dem Bau entfernt werden müssen. Auch hier kann mit Messwerkzeugen am Bauteil oder mit einer Kollisionsanalyse in der Baugruppenumgebung geprüft werden, ob ausreichende Werkzeugzugängigkeit sichergestellt ist. Featurebasiert kann dies durch geeignete Gestaltung umgesetzt werden. So kann z. B. der konventionell rund ausgeführte Querschnitt eines Kanals, in Anlehnung an die von Allen und Dutta vorgeschlagene Vorgehensweise (Abschnitt 5.2.1.4), alternativ als tropfenförmige Variante gestaltet werden (vgl. Abb. 6-14). Optimiert werden kann diese Vorgehensweise durch die Nutzung von geeigneten benutzerdefinierten Features (engl. User Defined Feature, UDF). Das UDF enthält dann alle erforderlichen Modellierungsschritte die für die Erstellung der vordefinierten Geometrie notwendig sind. Somit ist auch bei wiederholter Nutzung eine einfache und schnelle Anwendung von erfolgreich evaluierten Formelementen möglich.

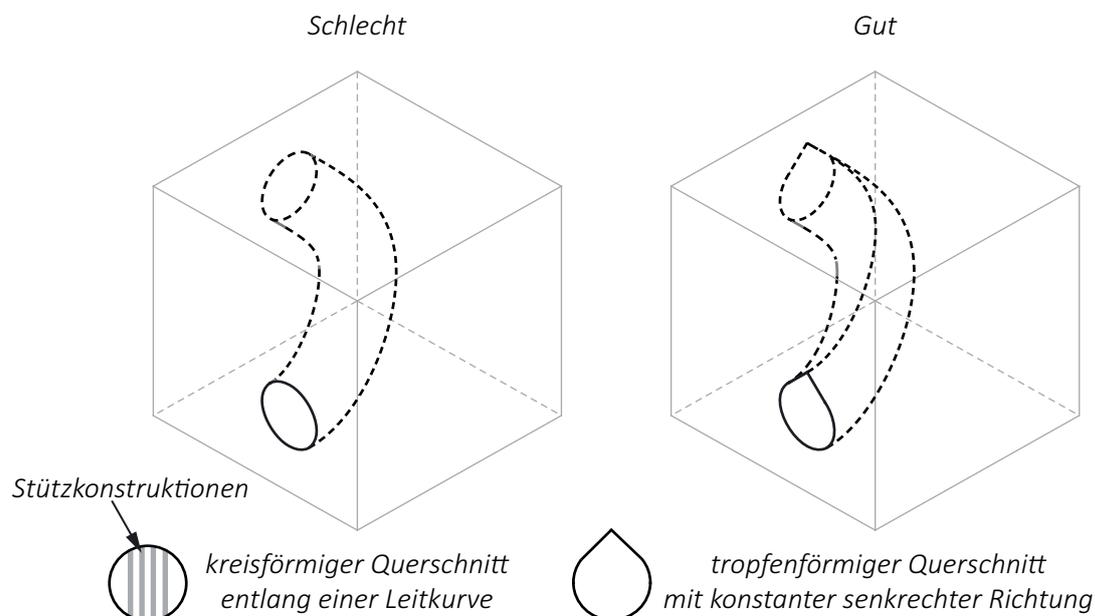


Abb. 6-14 Optimierte Gestaltung zur Vermeidung von Stützkonstruktionen

Zusammenfassend werden die Aktivitäten, mit deren Hilfe die fertigungsgerechte Gestaltung abgesichert werden kann, in einem Diagramm modelliert (Abb. 6-15). Die innere Schleife des Diagramms beschreibt die Aktivitäten, die zu der Gestaltung eines neuen Formelements erforderlich sind. Diese Schleife wird solange für jedes Element durchlaufen, bis die gesamte Bauteilgestaltung abgeschlossen ist. Innerhalb der Schleife erfolgt, falls nicht schon ein UDF vorhanden, die Gestaltung nach den bekannten Grenzwerten und Konstruktionskatalogen. Elementweise erfolgt dann eine Prüfung, ob durch die Änderung am Bauteil fertigungstechnische Restriktionen verletzt werden. Ist dies der Fall, sollte zunächst versucht werden, die Gestaltung anzupassen. Alternativ kann die gesamte Bauteilorientierung geändert werden. Handelt es sich bei dem erfolgreich erzeugten Element um Wiederholgeometrie sollte auch immer ein UDF erzeugt werden, um so die erneute Verwendung zu erleichtern. Letztlich wird nach der Gestaltung aller Elemente geprüft, ob das Bauteil gesamt noch den Maximalabmessungen entspricht. Ist dies nicht der Fall, muss es in kleinere Bauteile substituiert werden. Hierfür müssen ggf. die o. g. Schritte noch einmal durchlaufen werden. Eine einfache „Aufteilung“ des Bauteils durch eine Schnittoperation ist nicht immer möglich, da so Eigenschaften, die das Bauteil erfüllen muss, ggf. nicht mehr sichergestellt werden.

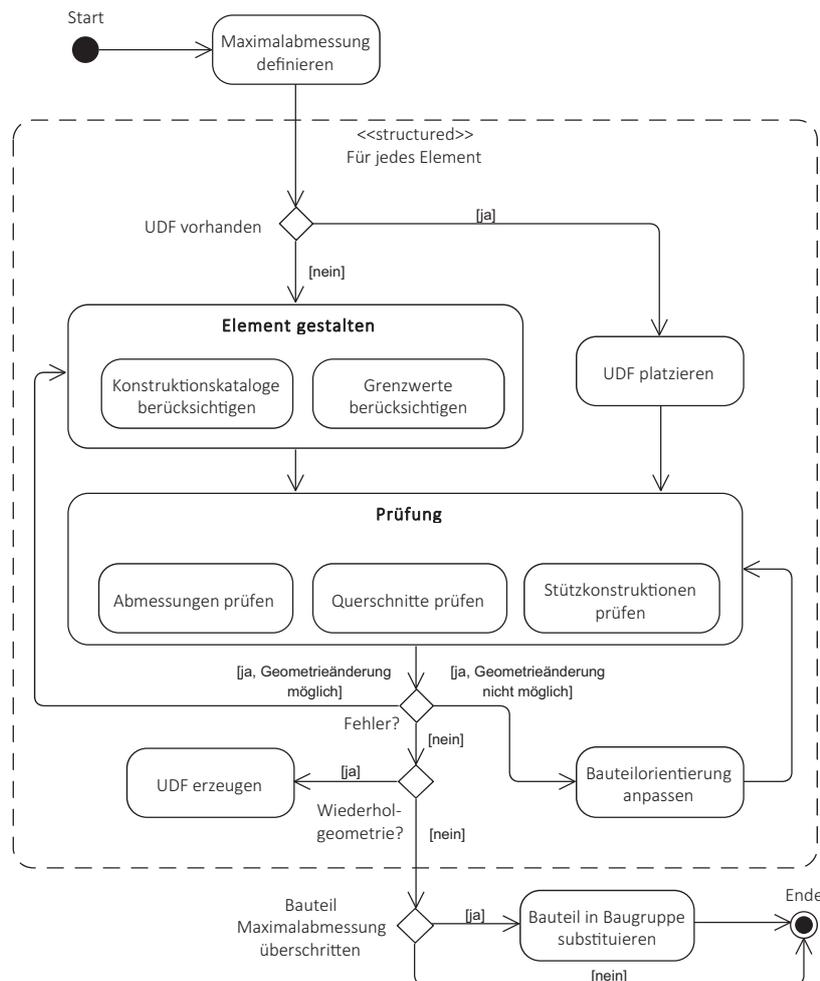


Abb. 6-15: Aktivitätsdiagramm zur Absicherung der fertigungsgerechten Gestaltung

6.1.5 Exemplarische Umsetzung der Integrationsstufe 1

Die erste Integrationsstufe ist vollständig als Prototyp programmiert, wobei die CAD-Plugins für *PTC Creo 2.0* und *Autodesk Inventor 2014* entwickelt wurden. Die Programmierung erfolgt jeweils mit den API-Schnittstellen der Systeme. Als Programmiersprachen werden dementsprechend *Object Toolkit C++* (*Creo*²⁴) und *Visual Basic .NET* (*Inventor*²⁵) genutzt. Da es sich in beiden Fällen um objektorientierte Programmiersprachen handelt, können die mit SysML modellierten Zusammenhänge als Programmcode abgeleitet werden.

Die Programmierung erfolgt in der *Microsoft Visual Studio* Umgebung. Die als integrierbare Stand-Alone-Lösung entwickelte Applikation Additive Manufacturing Parameters (AMP) ist ebenfalls mit *Visual Basic .NET* programmiert.

6.1.5.1 Additive Manufacturing Parameters (AMP)

Wie in den vorherigen Abschnitten bereits erläutert, muss AMP alle geforderten fertigungsspezifischen Parameter erfassen, dokumentieren und austauschen können. Um dies auf möglichst einfache, benutzerfreundliche Art umzusetzen ist AMP als eine *ClickOnce* Applikation für *Microsoft Windows* programmiert. Somit wird die Installation auf ein notwendiges Minimum reduziert, ohne für die Applikation erforderliche Funktionen einzubüßen. Auch das webbasierte Veröffentlichen und Updaten der Applikation ist so sichergestellt.

Umgesetzt wurden mit AMP die zuvor erfassten Randbedingungen und Anforderungen zur Beschreibung eines Fertigungsprozesses. Die Grundidee von AMP ist somit, dass der Fertigungstechnologe prozessabhängig die notwendigen Informationen in die entsprechenden Formularfelder einpflegt. Die so erfassten Daten werden dann an den Konstrukteur übergeben, der diese wiederum mit AMP auslesen kann. Dazu ist AMP auch in der CAD-Umgebung integriert. Diese Integration wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

AMP legt die erfassten Daten dann in Form der in Abschnitt 6.1.2 definierten AMP-XML-Datei ab. So wird für jeden Prozess eine eigene AMP-XML-Datei erzeugt. Ergänzt wird dies bei Bedarf mit Fotos, deren Verwaltung und Ablage ebenfalls von der Applikation gesteuert werden. Da AMP als Ergänzung der CAD- bzw. CAM-Werkzeuge genutzt wird, wurde die Applikation in der Auflösung 1024 x 768 gestaltet. So sind die Informationen auch bei gleichzeitig geöffneten Programmfenstern darstellbar. Die Informationen werden dann in Registerkarten gesammelt und bereitgestellt. Die erste Registerkarte „Allgemeine Informationen“ dient der Erfassung bzw. Darstel-

²⁴ WWW: <http://de.PTC.com/product/Creo/3d-cad/parametric/extension/toolkit>

²⁵ WWW: <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?id=1079044&siteID=123112>

lung der wesentlichen Informationen der genutzten Anlage und dem verantwortlichen Fertigungstechnologen (siehe Abb. 6-16). Zudem wird neben dem verwendeten Material auch der Bauraum erfasst. Ist in der Registerkarte „Prozessinformationen“ ein Schrumpffaktor definiert, wird neben den Bauteilabmessungen auch die maximal zulässige Bauteilgröße angezeigt.

The screenshot shows the 'AMP - Additive Manufacturing Parameters' software interface. The window title is 'AMP - Additive Manufacturing Parameters'. The header includes the logo of 'UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN' and 'ipe Institut für Produkt Engineering'. The date '2015-4-15' is displayed. The main content area is divided into several sections:

- Navigation tabs:** Allgemeine Informationen (selected), Prozessinformationen, Geometrie, Weitere Hinweise, Datenaustausch und Info.
- Anlage und Material:**
 - Additives Fertigungsverfahren: [Dropdown menu]
 - Maschinenbezeichnung: [Text field]
 - Maschinenhersteller: [Text field]
 - Material: [Text field]
 - Maschinenstandort: [Text field]
 - Modifizierte Versuchsanlage
- Kontakt / Verantwortlich:**
 - Institution / Firma: [Text field] Universität Duisburg-Essen
 - Verantwortlicher Fertigungstechnologe: [Text field] Alexander Martha
 - Telefonnummer: [Text field] +49 203 379 3935
 - eMail: [Text field] alexander.martha@uni-due.de
- Bauraumklassifizierung:**
 - Quaderförmiger Bauraum:

Bauraum	Bauteil Max. (inkl. Schrumpf)	Einheit
Breite b		mm
Tiefe t		mm
Höhe h		mm
Radius R		mm
 - Zylinderförmiger Bauraum:

Bauraum	Bauteil Max. (inkl. Schrumpf)	Einheit
Durchmesser D		mm
Höhe h		mm

Abb. 6-16: AMP Registerkarte „Allgemeine Informationen“

Die Registerkarte „Prozessinformationen“ (Anhang Abb. 8-13) dient dazu, Prozesseigenschaften zu Materialien, Schichtdicken, Schrumpf und Verschachtelung zu erfassen. Hier erfolgt auch die Erfassung der für die Erzeugung von Stützkonstruktionen relevanten Grenzwerte Überhang und Überhangwinkel. Unter der Registerkarte „Geometrie“ werden alle Details bereitgestellt, die zur Beschreibung geometrischer Randbedingungen notwendig sind (Anhang Abb. 8-14). Es stehen Textfelder zur Beschreibung von geometrischen Eigenschaften für Wanddicken bzw. Außenmaße, Außendurchmesser und -radien, Spalt- bzw. Innenmaße, Innendurchmesser und -radien sowie weitere benutzerdefinierte Parameter zur Verfügung. Neben den Textfeldern ist es möglich, Parameter zu den genannten Punkten auch in tabellarischer Form zu erfassen (Anhang Abb. 8-15). Ebenfalls kann für jeden der Fälle eine benutzerdefinierte Abbildung oder ein Foto hinterlegt werden. Diese Vorgehensweise wird nach gemeinsamer Diskussion mit Anwendern als sinnvoll erachtet, da die Effekte von

falsch ausgeführten Elementen so sehr gut visualisiert werden können. Für die Erfassung der Grenzwerte ist die Fertigung von Proben unter den gewählten Parametern erforderlich. Um alle geometrischen Eigenschaften erfassen zu können, wird ein Probenkörper durch AMP bereitgestellt, der alle wesentlichen Elemente abbildet (Abb. 6-17). Dieser wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen am Rapid Technology Center (RTC) entwickelt [HoWi13]. Neben der Berücksichtigung von relevanten Formelementen zur Erfassung von geometrischen Randbedingungen ist die Gestaltung so erfolgt, dass durch einen möglichst flachen Aufbau mit vielen Hohlräumen Materialkosten und Zeit bei der Herstellung der Probengeometrie minimiert werden. Der Probenkörper wird in den Formaten AMF, STL und STEP bereitgestellt. Auch hier kann ein eigenes Bild eines gefertigten Probenkörpers in AMP gepflegt werden.

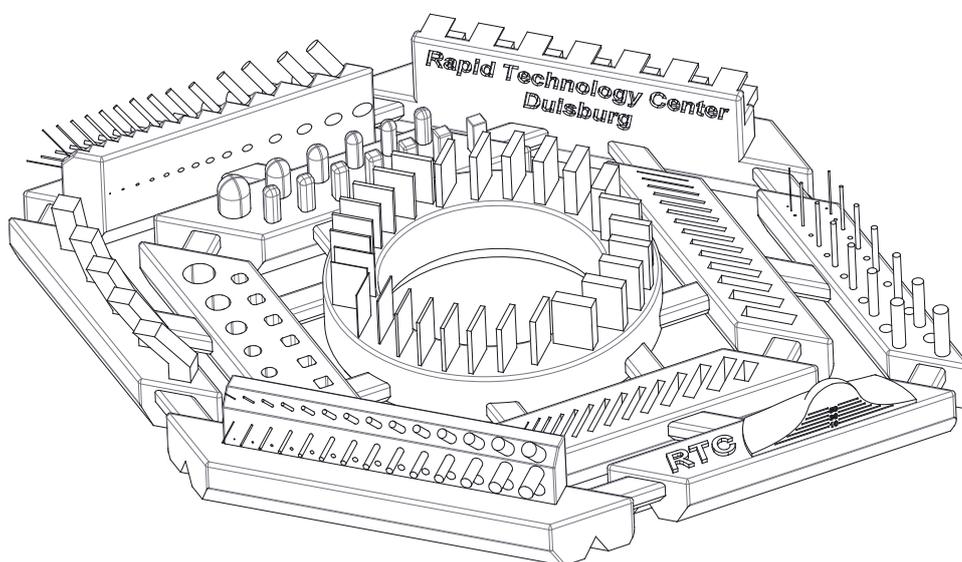


Abb. 6-17: AMP Probenkörper des RTC Duisburg

Die Registerkarte „Weitere Hinweise“ wurde nach Diskussion und Evaluierung in dem zuvor genannten projektbegleitenden Ausschuss ergänzt. Verfahrensbedingt kann es derzeit noch zu notwendigen Erweiterungen der definierten Eingabefenster kommen. Damit zusätzliche oder benutzerspezifische Punkte auch abgefangen werden können, steht hiermit die Möglichkeit zur Verfügung, ergänzende Informationen in Textform zu dokumentieren (Anhang Abb. 8-16).

In der letzten Registerkarte „Datenaustausch und Info“ werden alle Funktionen zum Im- und Export von AMP-XML-Dateien bzw. einem EXCEL-Bericht bereitgestellt. Hier können die Programmeinstellungen geändert bzw. die Felder auf die Standardwerte zurückgesetzt werden (Anhang Abb. 8-17). Beim Im- und Export der AMP-XML-Dateien werden auch die gepflegten Bilder mit gespeichert. Das Programm speichert diese in geordneter Form in demselben Verzeichnis wie die AMP-XML-Datei

und den EXCEL-Bericht. So liegen immer alle Informationen zu einem Prozess in einem Verzeichnis vor, das eindeutig mit der Prozesskennzahl benannt ist.

Aufgrund der Nachfrage aus verschiedenen Fachausschüssen (DIN/ISO und VDI) sowie aus dem projektbegleitenden Ausschuss des Projekts „*Wissensbasiertes Unterstützungssystem für Rapid Manufacturing 3D-CAD-CAM Prozesse*“ wird AMP in vollen Umfang, incl. Probenkörper, online²⁶ kostenfrei zur Verfügung gestellt.

6.1.5.2 Additive Manufacturing CAD Tool (AMC)

Hauptziel der ersten Integrationsstufe ist die Ergänzung grundlegender Funktionen zur Sicherstellung der fertigungsgerechten Produktgestaltung in die CAD-Umgebung. Zusammengefasst werden Funktionen zu den folgenden Punkten bereitgestellt:

- *fertigungsgerechte Startmodelle,*
- *Import und Export von neutralen Daten (STL, AMF etc.),*
- *Darstellung der mit AMP erfassten Parameter,*
- *Visualisierung des verfügbaren Bauraums,*
- *Analysefunktionen zur Absicherung der fertigungsgerechten Gestaltung,*
- *Kopplung an AF-spezifische CAM-Software,*
- *AF-spezifische Dokumentation.*

Die Bereitstellung der Funktionen erfolgt sowohl in *Creo* (Abb. 6-18) als auch in *Inventor* (Abb. 6-19) in eigenen Multifunktionsleisten (auch Menüband, engl. ribbon). Multifunktionsleisten sind ein mit Office 2007 eingeführtes grafisches Bedienkonzept für Anwendungsprogramme, das auch in den aktuellen Versionen von *Creo* bzw. *Inventor* genutzt wird.



Abb. 6-18 AMC *Creo* Multifunktionsleiste



Abb. 6-19: AMC *Inventor* Multifunktionsleiste

Beide Programme bieten dem Nutzer die Möglichkeit, die Multifunktionsleisten nach Bedarf anzupassen. Die genaue Prozedur der Anpassung und Konfiguration ist in den

²⁶ WWW: <http://udue.de/amt>

entsprechenden Handbüchern dokumentiert, die zusammen mit den AMC-Erweiterungen und AMP online erhältlich sind.

Die anschließenden Erläuterungen erfolgen jeweils exemplarisch an dem Beispiel eines der beiden für die Implementierung verwendeten CAD-Systeme. Das entwickelte Konzept wurde in beiden Systemen abhängig von der Programmierungsumgebung umgesetzt, wobei der Lösungsweg teilweise abweicht. Die Beschreibung der Funktionen erfolgt anhand der zu Beginn dieses Abschnitts genannten Punkte.

Fertigungsgerechte Startmodelle:

Fertigungsgerechte Startmodelle sollen die Anforderungen und Aktivitäten einer fertigungsgerechten Gestaltung sicherstellen. In diesem Kontext ist die Neuorientierung des Bauteils in Bezug auf die Baurichtung von großem Interesse (vgl. Abb. 6-15). Die CAD-Startmodelle sind so eingestellt, dass die benötigten Referenzen zur Modellierung vorhanden sind. Somit kann in der CAD-Umgebung die bei der AF genutzte Orientierung fallabhängig festgelegt werden. Die Ursprungsreferenzen bleiben dabei erhalten, sodass bei Übergabe der Modelldaten an externe Software-Tools keine erneute Orientierung erfolgen muss. Der Konstrukteur kann sich demnach auf die Gestaltung der Geometrie konzentrieren und die Lage und die Orientierung konstruktionsbegleitend im Bauraum anpassen.

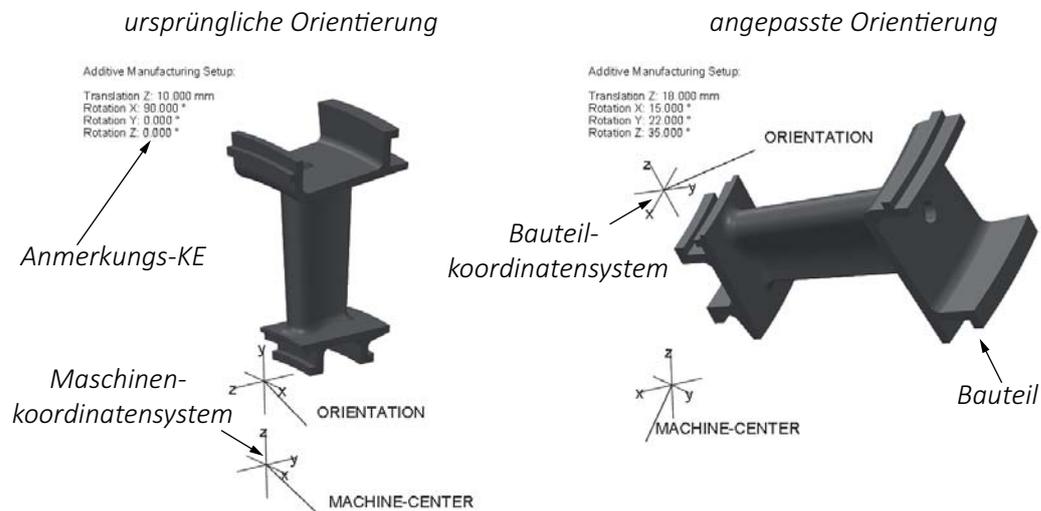


Abb. 6-20: Neuorientierung des Bauteils durch Parameter im *Creo*-Startmodell

Die beiden in Abb. 6-20 gezeigten Orientierungen desselben Bauteils zeigen die Vorgehensweise. Das Modell wird bei der Modellierung so referenziert, dass es komplett von dem Bauteilkoordinatensystem, dessen Orientierung und Position relativ zum Maschinenkoordinatensystem jederzeit anpassbar ist, abhängt. Die Anpassung erfolgt über die im Startmodell hinterlegten Parameter. Werden die Parameter dann, wie in *Creo* möglich, über ein Anmerkungs-KE im Modellbaum platziert, kann die Anpas-

sung auf komfortable Weise erfolgen. Ebenfalls sind die gewählten Werte jederzeit sichtbar. Vordefinierte Ansichten stellen eine schnelle Zeichnungsableitung und Dokumentation sicher. Das Blockdefinitionsdiagramm in Abb. 6-21 zeigt alle im Startmodell enthaltenen Elemente und die wesentlichen Abhängigkeiten.

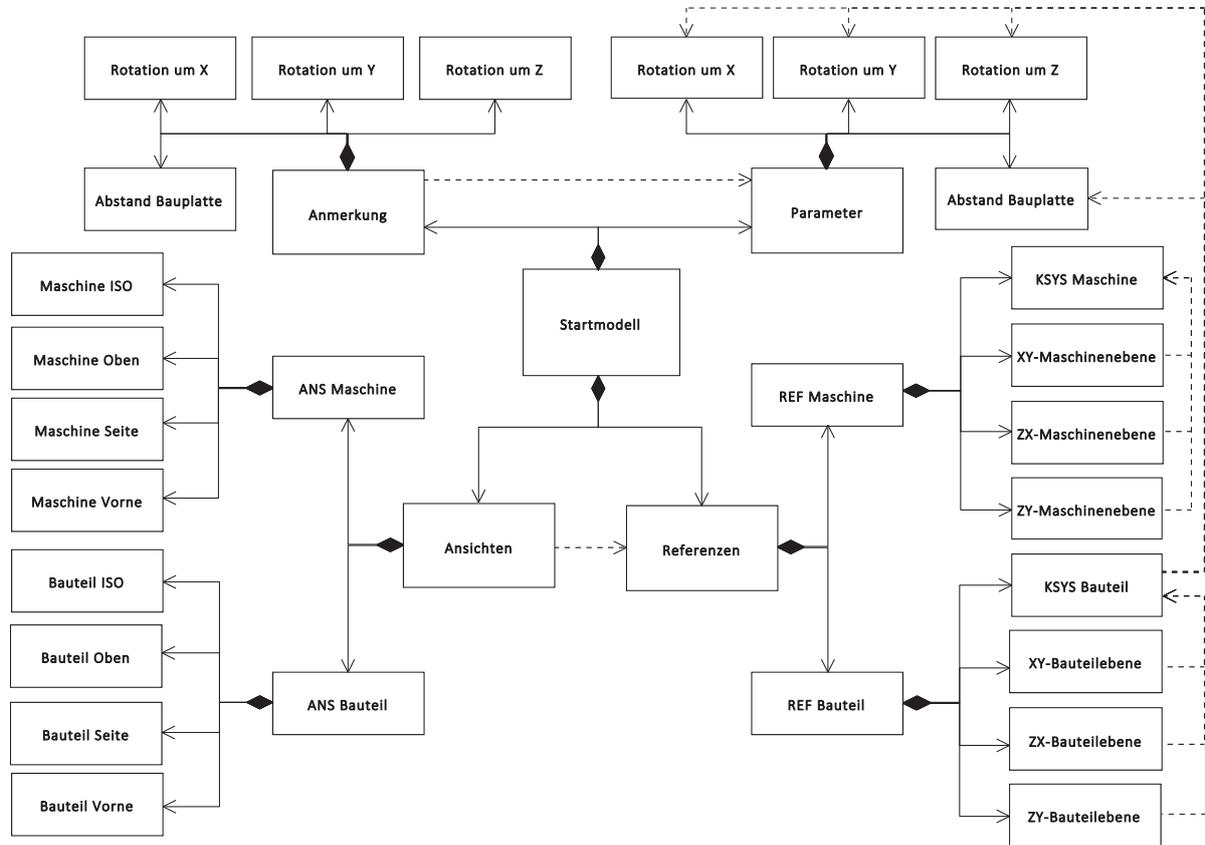


Abb. 6-21: Blockdefinitionsdiagramm des *Creo*-Startmodells

Import und Export von neutralen Daten:

Die betrachteten CAD-Systeme bieten über eigene Schnittstellen bereits die Möglichkeit, Daten in unterschiedlichen Formaten zu Im- oder Exportieren. Neben STL sind dies insbesondere bekannte neutrale Datenformate, wie STEP, IGES oder JT. Aktuelle Entwicklungen der großen CAD-Systemhäuser sehen es auch vor, direkt die nativen Daten anderer Systeme zu verarbeiten. Diese Fähigkeit wird üblicherweise als Multi-CAD-Lösung beschrieben [PTC15a].

Das derzeit meistgenutzte Datenformat für die AF ist STL. Dementsprechend sind in AMC die Funktionen zum Im- und Export von STL-Daten als Schaltflächen so konfiguriert, dass ein Schnellzugriff möglich ist. Genutzt werden hierbei jeweils die vorhandenen Funktionen der CAD-Systeme. Sowohl in *Creo* als auch in *Inventor* lassen sich die Exportparameter für STL-Dateien einstellen. Insbesondere bei der Verwendung von *Creo* sollte die Teilegenauigkeit vorher optimal eingestellt werden (vgl. Abschnitt 6.1.3). Beachtet werden muss ansonsten, dass die gewählte STL-

Genauigkeit beim Export die erforderlichen Details ausreichend gut auflöst. Da Dateigrößen bei der heute verfügbaren Hard- und Software kein wesentliches Kriterium mehr darstellen, ist eher eine zu feine als eine zu grobe Auflösung zu wählen. Optimal ist es hier, die STL-Dateien nach dem Export zu prüfen, da so exportbedingte Fehler durch Anpassung der jeweiligen Parameter minimiert werden können. Eine kurze Prüfung vor der Dateiweitergabe reduziert unnötige Iterationen und ggf. Mehraufwand durch anschließende STL-Reparaturarbeiten. AMC bietet hier die Möglichkeit, über konfigurierbare Schaltflächen externe Programme direkt zu verknüpfen. In diesem Zusammenhang hat sich die kostenlos verfügbare Software *Materialise MiniMagics*²⁷ bewährt, mit der eine schnelle Überprüfung der STL-Daten möglich ist. Ergänzend ist anzumerken, dass für den Export das zuvor definierte Maschinenkoordinatensystem als Referenz gewählt wird. So bleibt die vom Konstrukteur definierte Bauteilorientierung erhalten. Das Aktivitätsdiagramm in der folgenden Abb. 6-22 zeigt die vorgeschlagene Aktivitätsreihenfolge für den Export von fehlerfreien STL-Dateien.

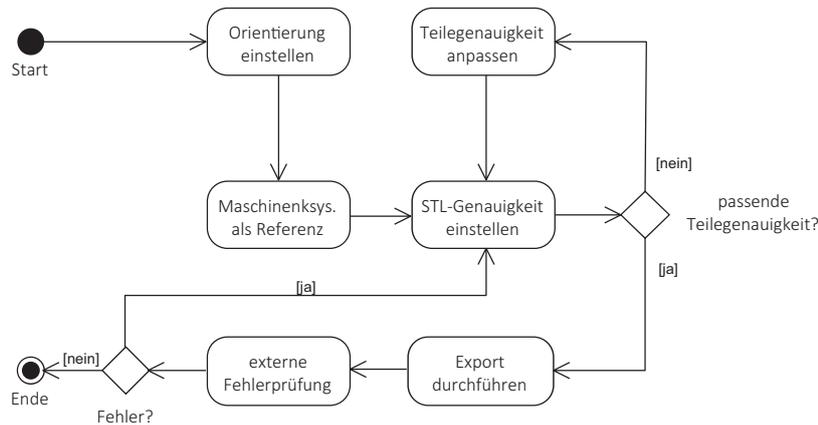


Abb. 6-22: Vorgehensweise beim STL-Export

Neben dem STL-Format wurde mit AMC das AMF-Format eingeführt. Die in *Inventor* implementierte Funktion zum Export von AMF-Daten sieht derzeit den reinen Export der geometrischen Informationen vor. Eine entsprechende Importfunktion ist für *Inventor* oder *Creo* nicht umgesetzt worden. Hier wird erwartet, dass die CAD-Systemhäuser zukünftig nachrüsten²⁸. Die programmierte Exportschnittstelle sollte diesbezüglich vordergründig deutlich machen, dass ein AMF-Export ohne große Probleme umsetzbar ist. Nebenprodukt dieser Implementierung ist ein STL-zu-AMF-Konverter, der auf der entsprechenden Projektwebseite²⁹ als Download verfügbar ist. Kern der mittels API-Programmierung implementierten AMF-Exportfunktion ist die Klasse „AMF“, die entsprechend der [ISO52915] gestaltet ist. Die entsprechende Klassenstruktur ist in Abb. 6-23 dargestellt.

²⁷ WWW: <http://software.materialise.com/minimagics>

²⁸ Im Rahmen des Kooperationsforschungsprojekts [KöWi14] wurde die AMF-Importfunktion vom Projektpartner GFaI erfolgreich in *Final Surface* implementiert. WWW: <http://www.final-surface.de/>

²⁹ WWW: <http://udue.de/amt>

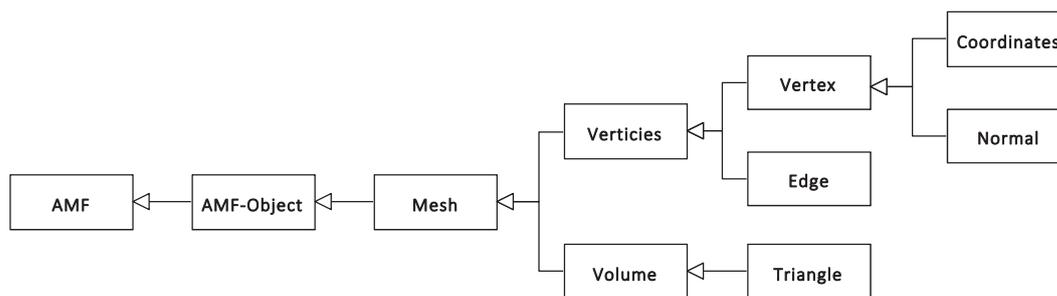


Abb. 6-23: AMF-Klassenstruktur

Der Exportalgorithmus greift dann auf die in *Inventor* verfügbaren Funktionen zur Vernetzung zurück, so können beim AMF-Export dieselben Einstellungen wie für STL-Dateien vorgenommen werden. Die Abb. 6-24 zeigt den entsprechenden Exportdialog. Ergänzte Funktionen sichern hier vor allem ab, dass die von *Inventor* bereitgestellte Vernetzung der Geometrie in die Struktur der AMF-Klasse übertragen und in AMF-spezifischer XML-Form abgespeichert wird. Dazu werden die Ergebnisse der Vernetzung so in Hashtabellen (auch Steuerwerttabelle, engl. hash table) zwischengespeichert, dass eine schnelle AMF-spezifische Sortierung und Zuordnung der Werte möglich ist. Die Vorgehensweise beim Export entspricht für den Benutzer der Vorgehensweise beim STL-Export (vgl. Abb. 6-22).

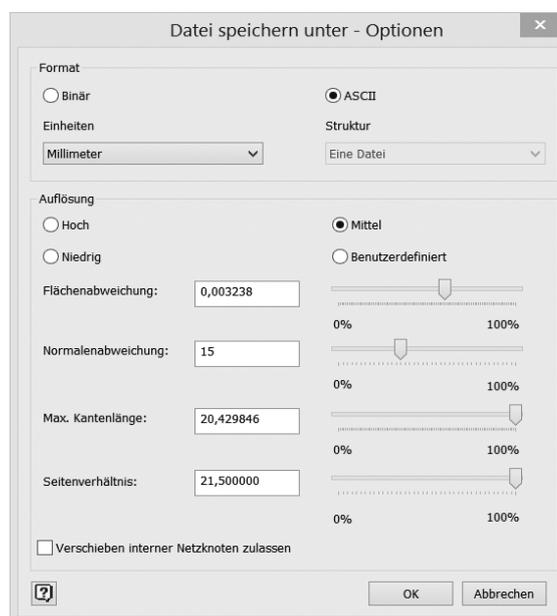


Abb. 6-24: AMF-Exportdialog

Darstellung der mit AMP erfassten Parameter und Visualisierung des zur Verfügung stehenden Bauraums:

Für die Darstellung der mit AMP erfassten Prozessparameter ist die AMP-Oberfläche in die für beide CAD-Systeme entwickelten Erweiterungen direkt integriert und kann über einen entsprechenden Menübefehl aufgerufen werden. Über eine Benutzerabfrage wird der Import einer AMP-XML-Datei abgesichert. So können die darin erfassten Parameter zum einen über die integrierte AMP-Anwendung dargestellt werden. Zum anderen stehen die Werte auch direkt für weitere Funktionen zur Verfügung. So wird der verfügbare Bauraum (effektiv nutzbarer Bauraum mit oder ohne Berücksichtigung von Schrumpfung) dem Benutzer in *Inventor* als dreidimensionale Skizze dargestellt. Für *Creo* ist diese Funktion mit einem UDF gelöst, das den Bauraum über eine Flächenextrusion ohne Grund- und Deckfläche darstellt. In Kombination mit dem Startmodell unterstützt diese Funktion insbesondere eine anlagengerechte Bauteilgestaltung.

Analysefunktionen zur Absicherung der fertigungsgerechten Gestaltung:

Beide berücksichtigten CAD-Systeme verfügen über eine Vielzahl von effektiven Analysewerkzeugen. Um hier dem Benutzer die Arbeit zu erleichtern, sind die als besonders relevant identifizierten Analysewerkzeuge in die AMC-Multifunktionsleiste integriert. Die CAD-seitig gelieferten Analysewerkzeuge werden an dieser Stelle nicht detailliert diskutiert, die beispielhafte Erläuterung von vier in *Creo* verfügbaren Funktionen soll lediglich das Prinzip verdeutlichen:

- *Funktion „Messen“*: Die Funktion „Messen“ stellt die elementaren Analysewerkzeuge zum Vermessen des Bauteils bereit. Dies ist neben einfachen Längen-, Durchmesser- und Winkelmessungen auch die Bestimmung von Flächeninhalten bzw. dem Volumen des Bauteils oder einzelner Elemente. Sinnvoller Funktionsumfang ist in diesem Kontext die Ermittlung der Transformationsmatrix zwischen zwei Koordinatensystemen. Dies kann sich bei der Beschreibung der Bauteilorientierung als sinnvoll erweisen. Mit *Creo* hat der Benutzer die Möglichkeit, die durchgeführten Analysen in der Form eines Analysefeatures im Modellbaum zu sichern. So können diese mehrfach genutzt oder durch weitere Funktionen, z. B. durch Parameter und Beziehungen, in die Modellierung integriert werden.
- *Funktion „kurze Kante“*: Um die Vernetzung und Baubarkeit der Bauteile sicherzustellen, müssen gewisse Grenzwerte eingehalten werden. Extrem kurze Kanten stellen ein Risiko bei der Vernetzung dar bzw. können später nicht durch den Prozess abgebildet werden. Solche Kanten entstehen häufig unbewusst im Modellierungsprozess, z. B. durch Verschneiden oder Verrunden. In AMP werden z. B. minimale Wandstärken erfasst, die auch als Indiz für minimal abbildbare kurze Kanten dienen. Kritisch sind in jedem Fall Kanten, die kürzer als die zu

verwendende Schichtdicke ausfallen oder kleiner als der verwendete Fokussdurchmesser des Lasers sind.

- *Funktionen „Schnittdicke“ und „3D-Dicke“:* Die Dickenprüfung („3D-Dicke“) in *Creo* ist in mehrfacher Hinsicht eine sinnvoll nutzbare Analysefunktion. Es können Materialanhäufungen identifiziert werden und die mit AMP beschriebenen minimalen und maximalen Wanddicken geprüft werden. Die Dickenprüfung ist darüber hinaus Schichtweise möglich („Schnittdicke“). So können die Effekte der Schichtzerlegung und die Dicken einzelner Elemente in Bezug auf die späteren Schichten abgeschätzt werden. Ebenfalls können Querschnittsprünge in Baurichtung so einfach erfasst werden. Diese Analysefunktion ist in Abb. 6-25 dargestellt. Definiert sind in diesem Beispiel Versatz, sowie Maximum und Minimum der Materialstärke. Die Ausgabe des Ergebnisses erfolgt als Textdatei oder in dem Menüfenster der Analyse. Beide Fälle sind in der Abbildung dargestellt.

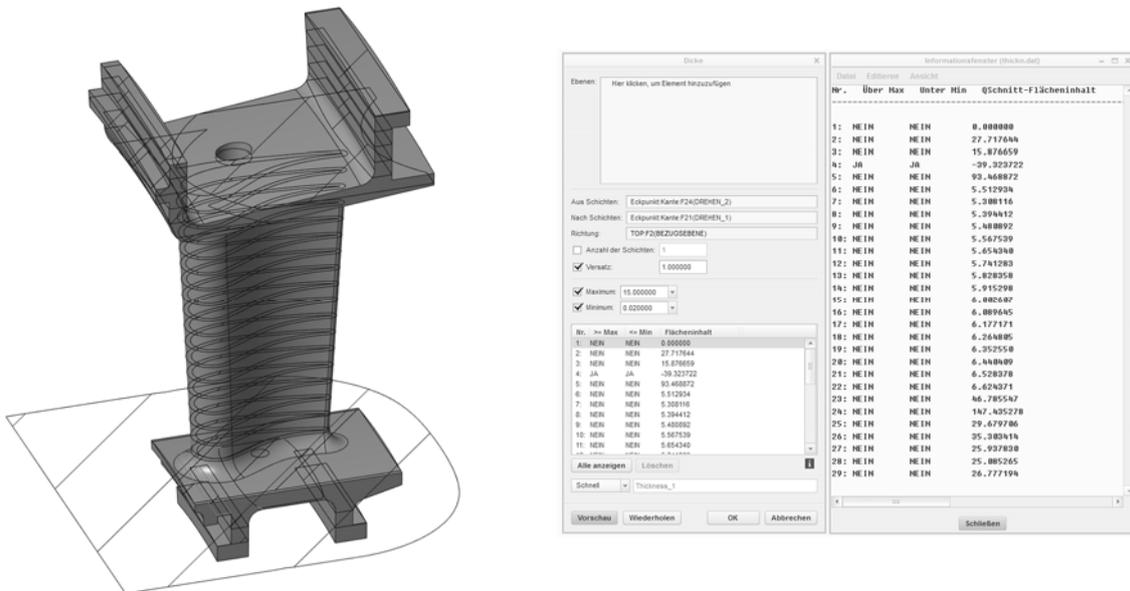


Abb. 6-25: Schnittdickenprüfung mit *Creo 3.0*³⁰

- *Funktion „Krümmung“:* Über die Analyse der Krümmung lassen sich zu kleine Elemente analysieren, die nicht unbedingt als kurze Kante erfasst werden. Auch hier sind insbesondere aus Verrundungen resultierende Problemstellen von Interesse. Über die Krümmungsanalyse kann auf den zugehörigen minimal verwendeten Verrundungsradius rückgeschlossen werden. Alternativ liefert die Analyse des minimalen Radius ein vergleichbares Ergebnis. In Bezug auf die Bauteilgröße oder Fertigungsparameter zu kleine Krümmungsradien können so vermieden werden.

³⁰ Größere Skalierung: Anhang Abb. 8-9

Neben den genannten Analysewerkzeugen ist besonders die Größe des gestalteten Bauteils bzw. einzelner Bauteilelemente von Interesse für die fertigungsgerechte Gestaltung. Um die Abmessungen schnell erfassen zu können, können verfügbare Systemfunktionen genutzt werden, beispielsweise die Funktion „Modellgröße“ in *Creo*. Diese ermittelt die Größe des gestalteten Modells über eine Boundingbox. Die BB-Diagonale dient hier als Kennwert für die Modellgröße. Für AMC wurde für beide Systeme eine ähnliche Lösung integriert, diese ermittelt die BB des Modells und erzeugt gleichzeitig eine Visualisierung dieser in Form einer 3D-Skizze (*Inventor*) bzw. einer Flächenextrusion (*Creo*). Ebenfalls werden die ermittelten Abmessungen dem Benutzer in übersichtlicher Form angezeigt. So kann jederzeit eine schnelle Abschätzung der Modellgröße erfolgen.

Kopplung an AF-spezifische CAM-Software:

Als wichtiger Punkt der CAD-Integration ist die Kopplung der CAD-Umgebung mit der AF-spezifischen CAM-Software umgesetzt worden. So kann zu jedem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses sofort fertigungsspezifisches Know-how mit eingebunden werden. Die Kopplung ist in dieser Integrationsstufe unidirektional von der CAD- hin zu der CAM-Seite implementiert. Über einen entsprechenden Funktionsaufruf kann der Nutzer den aktuellen Modelstand an eine CAM-Software übergeben. Dies ist so umgesetzt, dass die genutzten CAM-Tools frei konfiguriert werden können. Die Datenübergabe erfolgt hier mittels einem temporär gespeicherten STL-Modell. So wird in dieser ersten Integrationsstufe eine breite Integrierbarkeit vorhandener AF-CAM-Lösungen abgesichert. Einflüsse von Geometrieänderungen oder Neuorientierungen auf erforderliche Stützkonstruktionen können so schnell konstruktionsbegleitend überprüft werden.

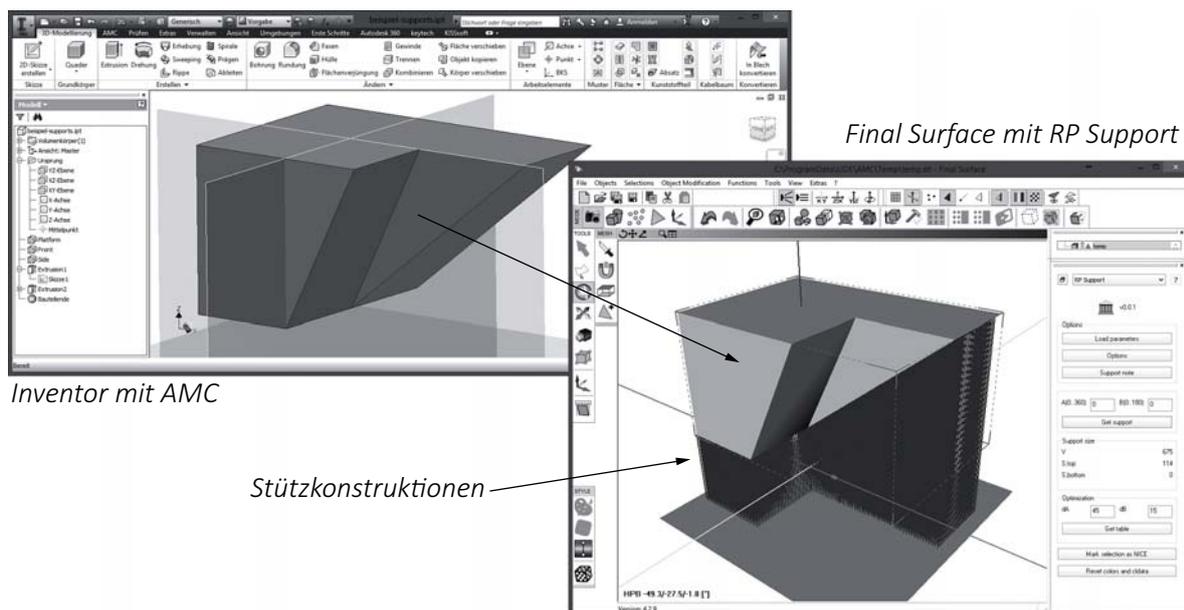


Abb. 6-26: Prüfung auf Stützkonstruktionen mit *Final Surface*

Evaluert wurde diese Vorgehensweise in Zusammenarbeit mit der *GFaI* und dem für *Final Surface* entwickelten *RP Support* Plug-In (Abb. 6-26). Das Beispiel zeigt, wie zu jedem Zeitpunkt im Modellierungsprozess über die entsprechende AMC-Funktion eine externe Software zur Prüfung der Geometrie gestartet werden kann, der zugleich der aktuelle Modellstatus übergeben wird. So kann in dem gezeigten Beispiel schnell geprüft werden, welche der gestalteten Modellflächen in der gewählten Orientierung Stützkonstruktionen benötigen, und welches Volumen etc. von den benötigten Stützkonstruktionen beansprucht wird.

Auf vergleichbare Weise können auch Effekte der Schichtzerlegung geprüft werden. Ergänzt wurde hier eine Funktion zur bereichsweise-adaptiven Schichtzerlegung. So können auf der CAD-Seite höhenabhängig Bereiche mit unterschiedlichen Schichtdicken ausgezeichnet werden. In Anlehnung an die in der Literatur (vgl. Abschnitt 5.3.2) beschriebenen Ansätze zur adaptiven Schichtzerlegung wird hier im Rahmen der ersten Integrationsstufe eine einfache Vorgehensweise gewählt, welche es dem Benutzer erlaubt, selber die Bereiche festzulegen, für die ein Schichtdickenwechsel vorzusehen ist. Derzeit ist es möglich, diese Informationen direkt an ein Plug-In³¹ von *Final Surface* zu übertragen, das dann in der Lage ist, CLI-Daten auf Basis von diesen Informationen zu erzeugen. Das in Abb. 6-27 gezeigte Beispiel verdeutlicht diese Vorgehensweise. In dem CAD-Modell werden über die entwickelte AMC-Funktion „Schichtbereiche ausweisen“ die Schichtdickenwechsel gekennzeichnet. Diese können auch über Ebenen im Modell visualisiert werden. Diese Informationen werden dann, zusammen mit der Modellgeometrie, an *Final Surface* übertragen.

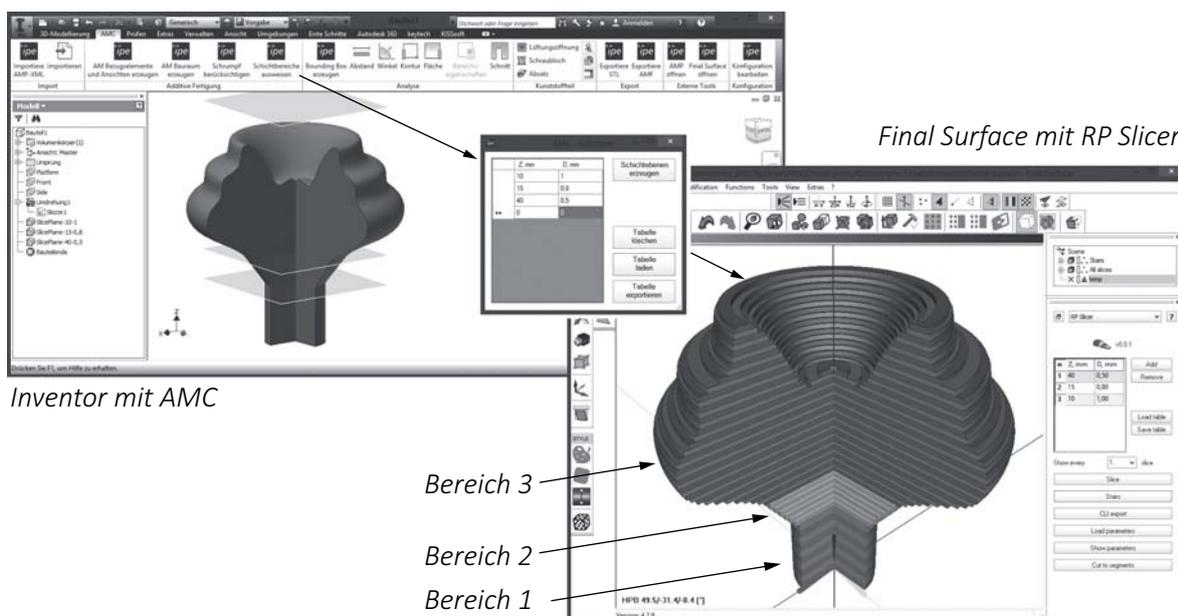


Abb. 6-27: Bereichsweise-adaptive Schichtzerlegung mit *Final Surface*

³¹ Die hier beschriebenen Erweiterungen für *Final Surface* sind Entwicklungen der GFaI, Berlin. Diese Entwicklungen sind Teil des Ergebnisses eines gemeinsamen Forschungsprojekts mit der UDE [KöWi14].

Mit *Final Surface* erfolgt die Schichtdatengenerierung und ggf. der CLI-Export. So lassen sich die resultierenden Effekte einfach und schnell beurteilen. Für das gezeigte Beispiel werden aus Visualisierungsgründen grobe Schichtdicken gewählt, wobei der zylinderförmige Teil des Bauteils am größten, der kegelförmige Teil feiner und der obere frei geformte Teil am feinsten geschnitten werden.

AF-spezifische Dokumentation:

Grundsätzlich sind die in den gängigen Normen und Richtlinien zur technischen Darstellung enthaltenen Konventionen einzuhalten. Auch wenn dies derzeit für die AF nicht die gängige Praxis darstellt, ist es empfehlenswert, immer ein Zeichnungsdokument zusammen mit den Modelldaten zu übergeben, das die wesentlichen Informationen zur Fertigung des Bauteils enthält. Dies sind neben den herkömmlichen Angaben vor allem die AF-spezifischen Angaben zu folgenden Punkten:

- *Bauteilorientierung:* Die bei der Konstruktion berücksichtigte Bauteilorientierung muss in geeigneter Form gekennzeichnet werden. Üblicherweise ist dies bereits durch die Orientierung der Ansichten gegeben. Zusätzlich ist es sinnvoll, die Bauteilorientierung, vergleichbar mit einer Lagetoleranz, in Bezug auf eine oder mehrere Referenzen des Bauteils anzugeben. Ergänzend können auch die genutzten Koordinatensysteme mit angegeben werden.
- *Bauteilabmessungen- und Volumen:* Ergänzend zu den üblichen allgemeinen Informationen ist es sinnvoll, noch die Maximalabmessungen des Bauteils durch die Angabe einer Boundingbox o. ä. zu kennzeichnen. Neben der Masse sollte auch das Volumen des Bauteils ausgewiesen werden. Diese Informationen erleichtern vor allem die Fertigungsplanung und eine schnelle Kostenabschätzung.
- *Stützkonstruktionen:* Sind Stützkonstruktionen erforderlich ist es notwendig in der Zeichnung zu kennzeichnen, ob beispielsweise einzelne Flächen oder Flächenbereiche von Stützkonstruktionen ausgeschlossen werden sollen. Dies kann durch geeignete Schraffuren oder Einfärbungen im 3D-Modell erfolgen. Ebenso sind Hinweise zu kritischen Stellen in Bezug auf bekannte Hinterschneidungen und Werkzeugzugänglichkeiten zu kennzeichnen.

Als Alternative zu einer Zeichnung können die Anmerkungswerkzeuge moderner 3D-CAD-Systeme genutzt werden. So stehen dazu beispielsweise die 3D-Anmerkungen³² in *PTC Creo* oder die Produktfertigungsinformationen (PMI³³) in *Siemens NX* zur Verfügung. Abschließend kann für diesen Punkt zusammengefasst werden, dass es nicht ausreicht nur den unkommentierten Modelldatensatz zu übergeben.

³² WWW: <http://creo.PTC.com/2014/01/24/3d-annotations-in-PTC-creo-parametric-versus-proengineer-wildfire-5-0/>

³³ WWW: http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/for-design/drafting-documentation/product-manufacturing-information.shtml

6.2 Integrationsstufe 2

Wie schon erläutert, wird mit der zweiten Integrationsstufe die Modellierungsumgebung erweitert. Im Fokus liegen hier die Optimierung der AF-gerechten Gestaltung durch optimierte Features, die Abbildung von heterogenen Material- und Bauteileigenschaften sowie eine dem Bauteil angepasste Schichtdatengenerierung (vgl. Abb. 6-3).

6.2.1 Gestaltung mit optimierten AF-Features

Die Gestaltung der Bauteile mit optimierten Features³⁴ basiert auf den in Abschnitt 6.1.4 beschriebenen Grundsätzen zur Absicherung einer fertigungsgerechten Gestaltung und stellt eine Erweiterung der in diesem Zuge beschriebenen Methode zur Nutzung von UDF dar. In Anlehnung an die zu Beginn von Abschnitt 6.1.4 formulierte Fragestellung wird die Problemstellung wie folgt formuliert:

Wie können Features für die AF-gerechte Gestaltung so integriert werden, dass eine optimierte Bauteilgestaltung unterstützt wird?

Bei der in Integrationsstufe 1 beschriebenen Vorgehensweise wurde diskutiert, wie durch Beachtung von Konstruktionsregeln u. ä. die AF-gerechte Gestaltung abgesichert werden kann. Um die hier beschriebene weitergehende Fragestellung zu beantworten, muss eine Lösung entwickelt werden, die unter Berücksichtigung von bekannten Regeln durch Methoden der Wissensintegration direkt Werkzeuge zur Gestaltung bereitstellt. In Anlehnung an den in der CAD-Umgebung genutzten Feature-Begriff werden die entwickelten Lösungen als AF-Feature bezeichnet.

Zur Beantwortung der Eingangsfrage werden bereits bekannte Konzepte der Wissensintegration von fertigungsbezogenen Features genutzt. Ein Ansatz ist hier z. B. die im Rahmen des Verbundforschungsprojekts „Effizienzsteigerung der CAD-CAM-Prozesskette durch fertigungsgerechte CAD-Modellierungsmethoden“³⁵ an der UDE entwickelte Methodik zur Integration von Konstruktionsfeatures zur optimierten zerpannungsgerechten Gestaltung [HuKö14]. Diese Vorgehensweise sieht vor, bestehende Informationen zu Werkzeugmaschinen, Werkzeugen und Abläufen so in Modellierungsfeatures zu integrieren, dass eine möglichst fertigungsoptimale Gestalt erreicht wird. Diese ist gleichzeitig mit den erforderlichen Herstellschritten angereichert. So stehen beispielsweise Features für Passfedernuten oder Zentrierbohrungen zur Verfügung, die neben der Geometrie das Modell auch mit den benötigten Werkzeugen und Fertigungsschritten anreichern. Diese Art der Integration von fertigungsorientierten

³⁴ Features sind nach VDI-Richtlinie 2218 informationstechnische Elemente, die Bereiche von einzelnen oder mehreren Produkten repräsentieren. Ein Feature wird als Zusammenfassung von Geometrielementen beschrieben. Synonyme sind „Konstruktionselement“, „Gestaltelement“ oder „Technisches Objekt“.

³⁵ WWW: <https://www.uni-due.de/cae/cam.shtml#KonventionelleFertigung>

Features lässt sich prinzipiell von der konventionellen auf die additive Fertigung übertragen.

Ebenfalls dienen bereits in den CAD-Systemen vorhandene Features und Erweiterungen als Vorbilder für den Lösungsansatz. So stehen üblicherweise Bohrungsfeatures zur Verfügung, mit deren Hilfe die nach Norm zulässigen Bohrungen ausgeführt werden können. Ähnliches stellt in *Creo* die Umgebung zur Profilkonstruktion³⁶ dar, mit deren Hilfe Stahlkonstruktionen und Verschraubungen normgerecht und mit bei Zulieferern verfügbaren Bauelementen gestaltet werden. *Inventor* bietet diesbezüglich Lösungen zur Definition von Kunststoffteilen³⁷. So können Schnappverschlüsse, Lippen u. ä. wissensbasiert gestaltet werden.

Die Methodik lässt sich in allen genannten Fällen wie folgt zusammenfassen: der Software steht über eine interne oder externe Datenbank explizites Wissen zur Verfügung. Das bedeutet, formalisierte Informationen sind so verknüpft und aufbereitet, dass diese für die CAD-Modellierung genutzt werden können. Der Benutzer selber benötigt dann bei der Anwendung nicht zwangsweise alle im System bekannten Informationen. So wird beispielsweise bei der Platzierung einer Gewindebohrung direkt der richtige Kernlochdurchmesser vom System ausgewählt. Die Anwendung erfolgt üblicherweise über Schaltflächen und Auswahlmenüs zur Selektion von Varianten und deren Ausprägung. Die Platzierung erfolgt dann, wie bei „normalen“ Gestaltungsfeatures auch, über eine geeignete Referenzierung. Diese Art der wissensbasierten Vorgehensweise wird auch in dem hier entwickelten Ansatz genutzt.

Die entsprechende Umsetzung sieht hier die Erweiterung von AMT mit einer Datenbank vor (siehe Abb. 6-28). Die Datenbank wird über AMP mit den benötigten Informationen der Fertigungstechnologen kontinuierlich gepflegt. Dies kann gekapselt beim Nutzer erfolgen, effektiv wird diese Lösung jedoch erst durch die Nutzung in größerem Maßstab. So ist vorstellbar, dass entsprechende Kenn- und Grenzwerte beispielsweise durch die Anlagenhersteller über einen an die Datenbank gekoppelten Webservice gepflegt werden. Demzufolge stünden dem Konstrukteur immer die aktuellsten und vom Anlagenhersteller empfohlenen Parameter zur Verfügung.

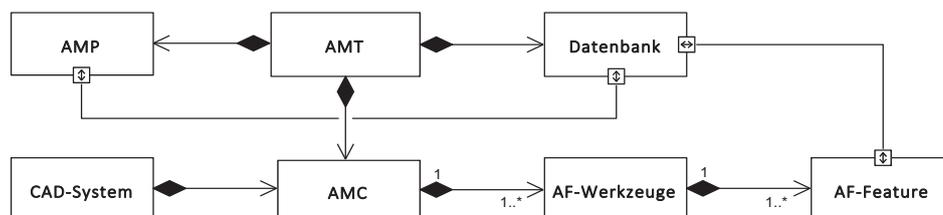


Abb. 6-28: Erweiterung von AMT mit einer Datenbank zwecks Wissensintegration

³⁶ WWW: <http://de.creo.PTC.com/2014/05/29/structural-framework-design-in-PTC-creo-parametric/>

³⁷ WWW: <http://www.autodesk.de/adsk/servlet/item?siteID=403786&id=11782009&linkID=411015>

Die CAD-Integration erfolgt dann durch eine Erweiterung von AMC mit Werkzeugkästen zur Produktgestaltung. Diese AF-Werkzeugkästen enthalten für die Fertigung optimierte Features zur Gestaltung. Die AF-Features bekommen die Werte für ihre Ausprägung aus der Datenbank zugewiesen. So wird sichergestellt, dass die Gestalt den erforderlichen Grenzwerten entspricht. Die in den vergangenen Jahren am Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion der UDE entwickelten Lösungen zum Forschungsschwerpunkt „*Wissensbasierte Systeme*“ können für diese Umsetzung genutzt werden (siehe z. B.: [HuKö14], [Du08], [Lu09], [St06]). Somit kann diese Erweiterung mit dem vorhandenen Know-how direkt implementiert werden.

Aufbereitet werden die Werkzeugkästen und Features mit der für die erste Integrationsstufe vorgestellten Vorgehensweise. Entsprechende mittels API programmierte Multifunktionsleisten repräsentieren die AF-Werkzeugkästen mit den enthaltenen AF-Features. Durch weitergehende Dialoge wird der Benutzer bei der Variantenauswahl, Wertedefinition und Platzierung unterstützt. Zur Definition der Features eignet sich u. a. die zuvor in dieser Arbeit beschriebene UDF-Methodik.

Die Auswahl der umzusetzenden Features orientiert sich vor allem an den durch Konstruktionsregeln u. ä. beschreibbaren Geometrien (vgl. Abschnitt 6.1.3). Dies sind insbesondere Elemente, die in unterschiedlichen Szenarien wiederverwendet werden. Aber auch Basiselemente können so, angereichert um die Informationen aus der Wissensbasis, direkt fertigungsgerecht erzeugt werden. Die zwei folgenden allgemeinen Beispiele sollen das Prinzip der AF-Feature verdeutlichen:

- *Extrusion von Stäben und Zylindern*: Stab- oder zylinderförmige Elemente sind durch ein Länge zu Umfang bzw. Länge zu Durchmesser Verhältnis in ihrer Ausprägung beschränkt. Wird ein AF-gerechtes Extrusionsfeature mit diesen zusätzlichen Informationen angereichert, kann eine fertigungsgerechte Konstruktion direkt bei der Modellierung abgesichert werden. Ähnlich können auch dünne Wände, Spalte oder Rundungen als fertigungsgerechte Feature aufbereitet werden. Die Modellierung der Features erfolgt im SysML-Modell jeweils als Blockdefinitionsdiagramm. Für das einfache Beispiel des AF-Zylinders ist dies in Abb. 6-29 dargestellt. Das Diagramm zeigt insbesondere die Abhängigkeit der geometrischen Ausprägung von der Orientierung des Zylinders. So ist in der Abfragereihenfolge des Benutzerdialogs als Platzierungsreferenz eine Ebene vorgesehen. Abhängig davon wird die Richtung der Austragung vom Benutzer definiert. Der mögliche Durchmesser ist dann von dieser gewählten Orientierung abhängig, da durch den schichtweisen Aufbau vor allem der Querschnitt in Baurichtung relevant ist. Die mögliche herstellbare Länge basiert wiederum auf der Wahl des Durchmessers. Verfügbare und dem Benutzer angezeigten Wertebereiche werden über eine Kommunikation mit der Datenbank ermittelt, in der die Parameter

orientierungsabhängig erfasst sind. Problematisch ist diesbezüglich eine spätere Neuorientierung des gesamten Modells. Demzufolge ist es möglich, dass einzelne Elemente nicht mehr den Vorgaben entsprechen. Daher muss nach einer Neuorientierung immer eine umfassende Überprüfung der vorausgegangenen Modellierungsschritte erfolgen. Um hier Sicherheit herzustellen, werden die Benutzerabfrage und Datenbank so gestaltet, dass Parameter entweder orientierungsabhängig übernommen oder „Maximalwerte“ genutzt werden. Diese sind folglich orientierungsunabhängig. Nachteil ist dann jedoch, dass Freiheitsgrade bei der CAD-Modellierung verloren gehen können.

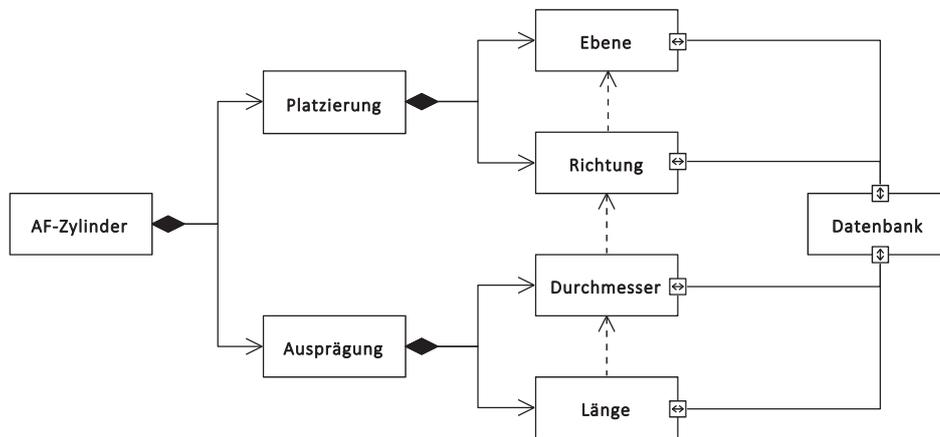


Abb. 6-29: Blockdefinitionsdiagramm des AF-Zylinder-Features

- *AF-Gewindebohrungsfeature*: Werden Bohrungen direkt mit Innengewinde ausgeführt, bieten diese additiv gefertigten Gewinde nicht immer die notwendige Festigkeit oder Genauigkeit. Daher kann alternativ additiv nur ein angepasstes Kernloch gefertigt werden. Das Gewinde wird dann konventionell nachgearbeitet. Das AF-Gewindebohrungsfeature platziert somit nur ein Kernloch mit dem in der Datenbank gespeicherten Durchmesser in dem CAD-Modell. Die Information, dass nach der additiven Fertigung weitere Fertigungsschritte anfallen, ist ebenfalls in das Feature integriert, sodass diese Folgeoperationen durch Anmerkungen ersichtlich sind.

Verfahrensabhängig lässt sich dieses Feature auch umgekehrt aufbauen. Denn anwendungsspezifisch reichen die mechanisch-technologisch erreichbaren Eigenschaften des additiv gefertigten Gewindes ggf. auch aus. Üblicherweise werden Gewinde in der CAD-Umgebung jedoch nicht komplett dargestellt, um Rechenleistung zu sparen. Dies ist hier dann nicht möglich. Für diesen Fall muss die Geometrie vollständig in dem CAD-Modell abgebildet werden, um bei der Schichtdatengenerierung berücksichtigt werden zu können.

In Abb. 6-30 ist der Prozedurablauf für die Platzierung eines AF-Features am Beispiel des Features AF-Bohrung dargestellt. Die Abbildung zeigt die erforderliche

Aktivitätsreihenfolge und kennzeichnet, ob die jeweiligen Aktivitäten in Interaktion mit dem Benutzer oder durch AMC im Hintergrund erfolgen. Die Wissensintegration erfolgt durch die gekennzeichnete Interaktion einzelner Aktionen mit der Datenbank.

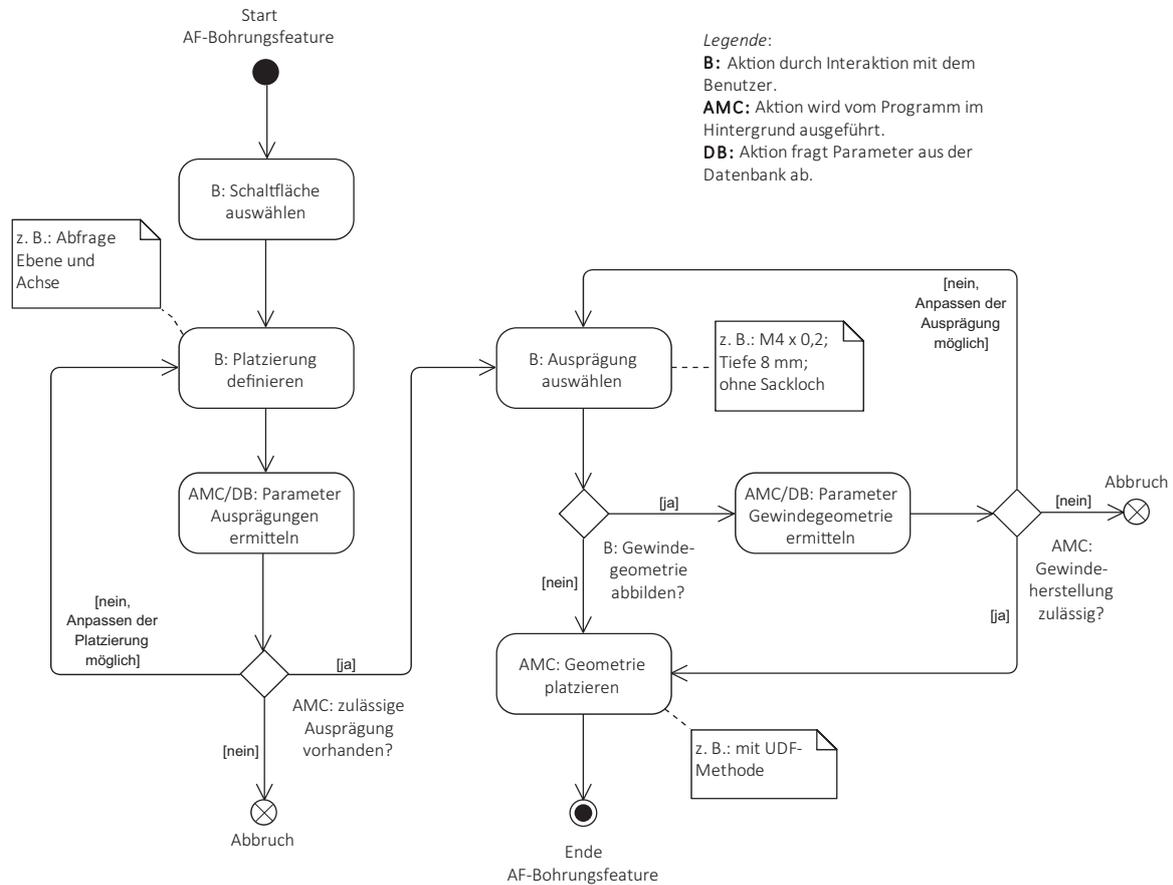


Abb. 6-30: Aktivitätsdiagramm zur Ablaufbeschreibung der AF-Feature-Nutzung

Neben den zuvor genannten, allgemein nutzbaren AF-Features, werden auch exemplarisch zwei – auf den Demonstrator bezogene – AF-Features erläutert:

- *Kühlkanäle und Kühlluftbohrungen:* Hier ist insbesondere zu beachten, dass diese so ausfallen, dass nicht verfestigtes Pulver vollständig entfernt werden kann. Zu kleine Kanäle können auch fertigungsbedingt zugeschweißt werden. Bei größeren Kanälen muss sichergestellt werden, dass Stützkonstruktionen entweder vermieden werden oder entfernbar bleiben (vgl. 6.1.4). Für diese Fälle werden somit eigene Features vorgesehen, deren Ausprägung über die in der Datenbank hinterlegten Werte gesteuert wird. Als Grundlage für ein solches Feature dienen Austragungen entlang von Leitkurven (vgl. Abb. 6-14). Die Implementierung erfolgt entsprechend der zuvor beschriebenen Vorgehensweise in Anlehnung an Abb. 6-29 und Abb. 6-30.

- *Bearbeitungszugaben:* Ein weiteres Feature das für den betrachteten Anwendungsfall benötigt wird, ist eine Funktion zum gezielten Aufdicken von einzelnen Bereichen des Bauteils, wie in Abb. 6-31 dargestellt. Dies ist erforderlich, da nach der AF eine bereichsweise mechanische Nachbearbeitung erfolgen kann, um die erforderlichen Toleranzen und Passungen sicherzustellen. Dies betrifft insbesondere Kopf- und Fußteil sowie Teile der Schaufeloberfläche. Umgesetzt wird dieser Punkt durch Funktionen zum Flächenversatz. Diese sind bereits in den CAD-Systemen verfügbar und müssen nur anforderungsgerecht angepasst werden. Wesentlich ist auch hier, dass das Aufdicken die in der Datenbank beschriebenen Randbedingungen erfüllt. Oft kommt es durch diese Operation zum Unterdrücken von zuvor erzeugten, kleinen Elementen. Hier müssen Benutzerabfragen und Hinweise sicherstellen, dass keine ungewünschten Effekte in das Modell eingebracht werden. So sollte der Versatz der Aufdickung immer kleiner als der minimal verwendete Krümmungsradius ausfallen bzw. Radien vorher nicht zu klein definiert werden. Der minimale Krümmungsradius eines Bauteils kann über die Analyse des Kehrwerts der Minimalkrümmung analysiert werden.

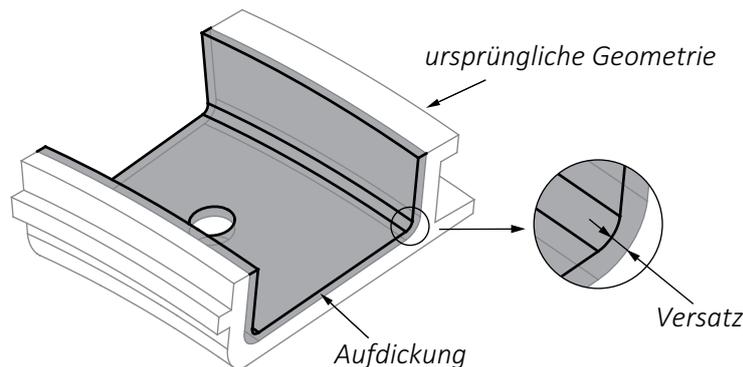


Abb. 6-31: Erzeugen von Bearbeitungszugaben durch Aufdicken

6.2.2 Abbildung von heterogenen Material- und Bauteileigenschaften

In Anlehnung an die in Kapitel 5 untersuchten Ansätze muss die entwickelte Lösung die in Abschnitt 5.4 beschriebenen Fälle von heterogenen Bauteileigenschaften abdecken. Dies sind erstens die Abbildung von lokalen Bereichen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften, zweitens gradierte Materialeigenschaften und drittens bereichsweise definierte Strukturen. Die Struktur der Lösung ist in Abb. 6-32 dargestellt. In dem gezeigten Paketdiagramm sind auch die Abhängigkeiten von der Materialzuweisung und der Materialdefinition gekennzeichnet. Die entsprechenden Materialbereiche in dem CAD-Modell auszuweisen ist in diesem Kontext der erste Schritt, für den eine Lösung beschrieben werden muss.

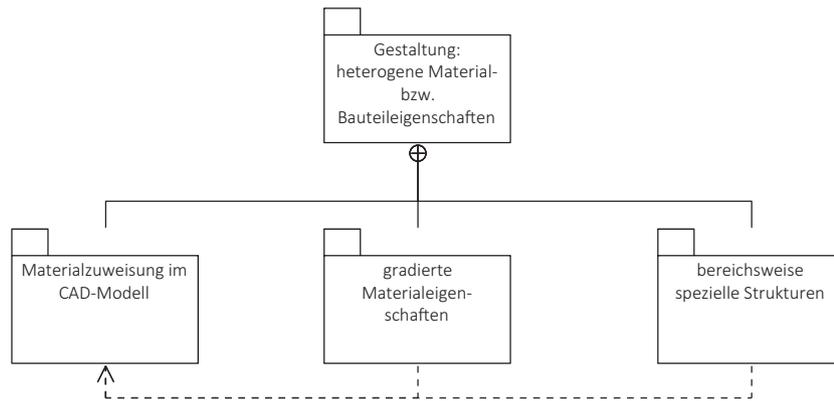


Abb. 6-32: Strukturierung der Lösung zur Abbildung von Materialeigenschaften

6.2.2.1 Materialzuweisung im CAD-Modell

Als Lösung für die Materialzuweisung im Modell werden zwei verschiedene Vorgehensweisen entwickelt. Diese basieren auf den in Abschnitt 5.4.1 recherchierten Ansätzen der featurebasierten und der verbundmodellbasierten Vorgehensweise. Im Gegensatz zu den weiteren bekannten Ansätzen sind diese Vorgehensweisen gut dazu geeignet, durch Umfunktionierung bestehender Lösungen in der vorhandenen CAD-Software implementiert zu werden.

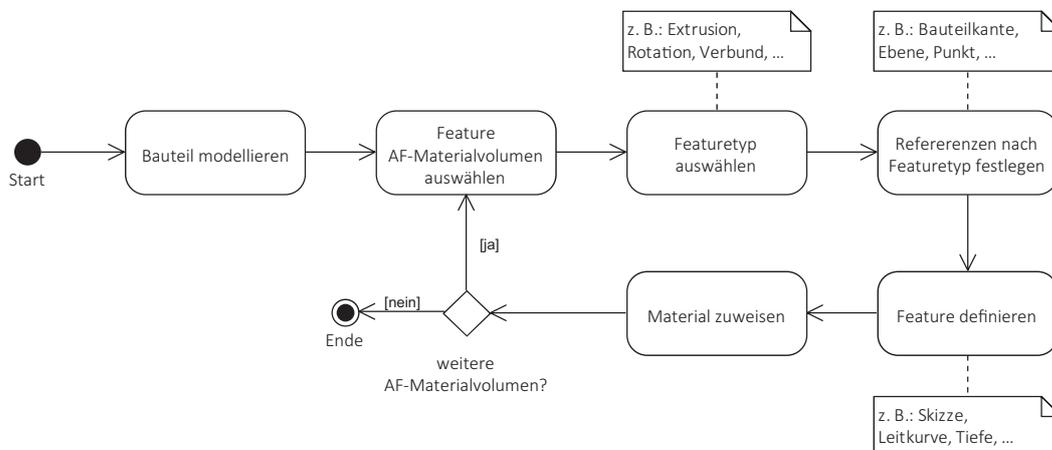


Abb. 6-33: Top-down-Ablauf der featurebasierten Materialzuweisung

Die featurebasierte Vorgehensweise wird hier als Top-down-Methodik entwickelt, diese ist im Ablaufdiagramm in Abb. 6-33 gezeigt. Dementsprechend wird zunächst das gesamte CAD-Modell gestaltet, ohne dass die Materialvolumina direkt ausgewiesen werden. Ist die Modellierung abgeschlossen, wird das Feature zur Definition der verschiedenen Materialvolumina genutzt, um über verschiedene Featuretypen die Bereiche mit unterschiedlichen Materialien zu kennzeichnen. Diese Featuretypen sind abhängig vom CAD-System „gängige“ Funktionen zur 3D-Modellierung. Als Referenzen können für die Platzierung der Features z. B. die modellierten Bauteilkanten und Flächen genutzt werden. So wird bei sinnvoller Referenzauswahl sichergestellt, dass die

definierten Bereiche auch bei Geometrieänderungen im Modell erhalten bleiben. Dies stellte bei den bisher dokumentierten Ansätzen ein Problem dar. Die eigentliche Modellierung der Materialfeatures erfolgt nach der für das CAD-System üblichen Vorgehensweise, z. B. durch Extrusion einer Skizze. Sobald ein Volumenbereich definiert ist, kann das entsprechende Material zugewiesen werden. Dieses wird über eine Datenbank zur Verfügung gestellt.

In Abb. 6-34 ist gezeigt, wie diese Vorgehensweise in der CAD-Umgebung implementiert werden kann. Das in der Abbildung links dargestellte Beispiel zeigt die Leitschaukel mit unterschiedlichen Materialbereichen. Für Kopf- und Fußteil, Schaukelvorderkante und Schaukelhinterkante sind unterschiedliche Materialien definiert. Grundlage ist ein vorher definierter Volumenkörper. Genutzt wurde die *Creo Simulate* Umgebung. Hier ist die bereichsweise Zuweisung von unterschiedlichen Materialien in einem Modell bereits möglich. Durch Übertragung dieser Funktionen in die AMC Umgebung kann die zuvor beschriebene Vorgehensweise implementiert werden.

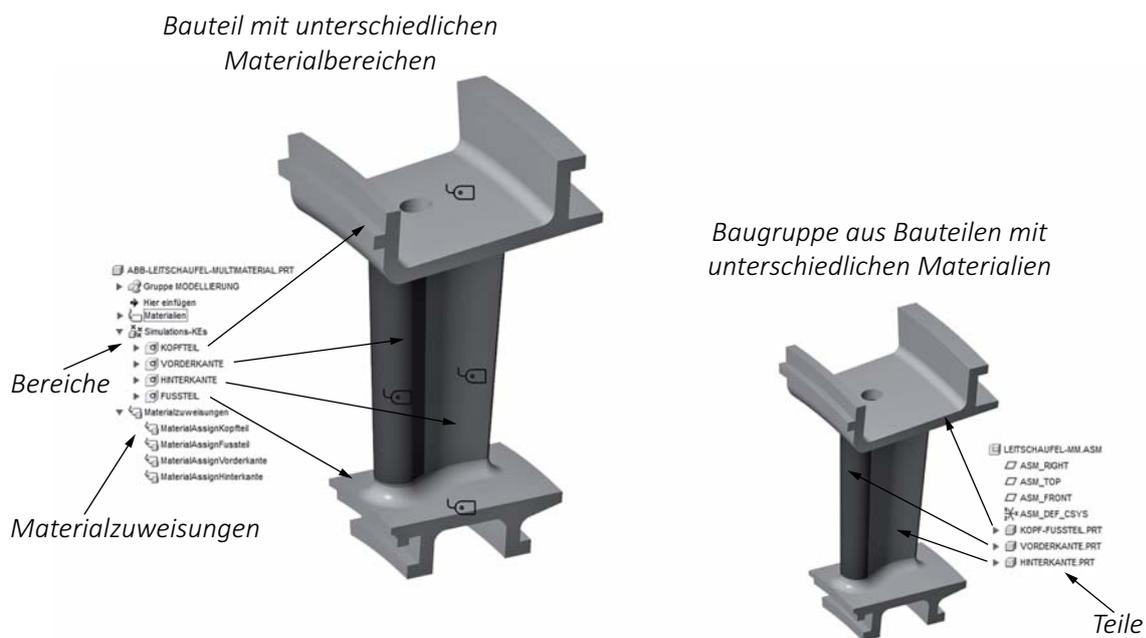


Abb. 6-34: Featurebasierte und verbundmodellbasierte Materialzuweisung

Als Alternative wird eine Bottom-up-Vorgehensweise in Anlehnung an Sun und Hu entwickelt (vgl. Abschnitt 5.4.1). Hier werden die einzelnen Bereiche als separate Modelle definiert, denen anschließend jeweils das entsprechende Material zugewiesen wird. Als Ergebnis erhält man eine Baugruppe. Dieser in Abb. 6-35 dargestellte Ablauf ist ebenfalls durch die bereits verfügbaren Werkzeuge der 3D-CAD-Systeme umsetzbar. Auf der rechten Seite in Abb. 6-34 ist dies dargestellt. Nachteil dieser Methode ist zum einen, dass die Bauteilumgebung verlassen wird. Dies kann jedoch durch Erweitern der Funktionen der Bauteilumgebung in der CAD-Software vermieden werden; durch Ergänzung der Option, einzelne Feature nicht miteinander zu verschmelzen,

sondern als separate Bereiche zu behandeln³⁸. Ein weiterer Nachteil der Bottom-up-Vorgehensweise ist zum anderen, dass die Referenzierung der jeweiligen Teile aufeinander mehr Aufwand erfordert, als bei einer Top-down-Vorgehensweise. Hier kann alternativ aber auch so vorgegangen werden, dass eine Funktionserweiterung entwickelt wird, die ein Einzelteil in verschiedene Teile erst dann substituiert, wenn die Modellierung des gesamten Bauteils abgeschlossen ist. Entsprechende Funktionen dazu sind bereits in den CAD-Systemen verfügbar.

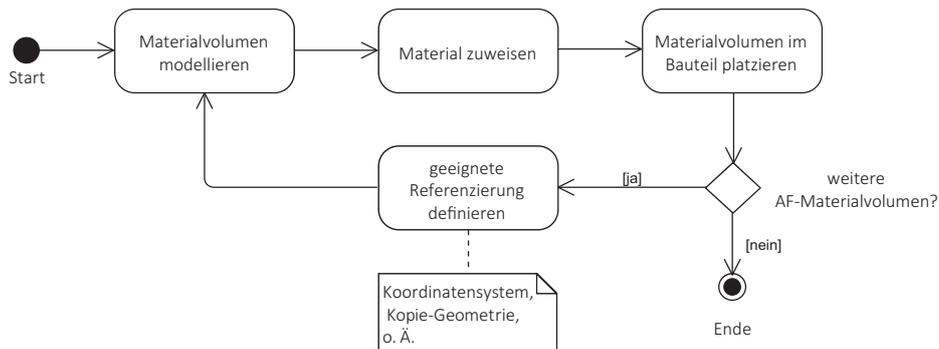


Abb. 6-35: Bottom-up-Ablauf der verbundmodellbasierten Materialzuweisung

6.2.2.2 Gradierte Materialeigenschaften

Die bekannten Lösungen zur Definition von gradierten Materialeigenschaften (vgl. Abschnitt 5.4.1) beschreiben insbesondere die Problematik mehrdimensionaler Materialverläufe bei komplexer 3D-Geometrie. Hier ist bis dato noch keine Lösung bekannt, mit deren Hilfe entsprechende Materialverläufe in einem 3D-CAD-Modell direkt abgebildet werden können. Insbesondere da die Lösung in der Modellierungsumgebung des 3D-CAD-Systems umgesetzt werden soll, kommen voxel- bzw. FE-basierte Lösungen zunächst nicht in Betracht. Auch wenn mit der Hilfe dieser Methoden das Modell beliebig diskretisiert werden kann und so eine feingliedrige Beschreibung der Materialverteilung möglich wird.

Ein hauptsächliches Problem, das in der Literatur bei der Beschreibung von gradierten Materialeigenschaften genannt wird, ist die Zuweisung der Bauteilbereiche, in denen die Verteilung vorliegen soll. Hier wird der Lösungsansatz aus dem vorherigen Abschnitt genutzt. Die Materialien mit gradierten Eigenschaften werden somit auf diese gekennzeichneten Bereiche aufgeprägt. Im Rahmen der Aufprägung wird vor allem die Ausrichtung des Materials in Bezug auf das Bauteilkoordinatensystem festgelegt.

Die eigentliche Materialdefinition erfolgt über die an AMC gekoppelte Datenbank. Mithilfe der Ansätze zur Beschreibung von Materialverhalten mittels expliziten oder impliziten Funktionen kann dann der Verlauf beschrieben werden. Wichtig ist an die-

³⁸ Abhängig von der genutzten Software ist dies bereits möglich (z. B. *Autodesk Inventor* Option „neuer Volumenkörper“)

ser Stelle vor allem, die Lösung so zu gestalten, dass die entsprechenden Informationen anschließend auch in Schichtinformationen überführt werden können. Diesbezüglich können die Ansätze von Hongmei et al. und Su et al. für eine Entwicklung genutzt werden (vgl. Abschnitt 5.4.1). Im Rahmen des in dieser Arbeit beschriebenen Anwendungsfalls der Leitschaukelkühlung werden Materialien mit gradierten Eigenschaften nicht als eine wesentliche Anforderung aufgeführt. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle keine tiefergehende Entwicklung einer Lösung.

Die Abb. 6-36 zeigt exemplarisch das Prinzip von gradierten Materialeigenschaften in Verbindung mit AF-Material-Features. Für ein Feature werden die Materialeigenschaften entlang einer Leitkurve beschrieben. Dabei soll hier die Dichte entlang der Leitkurve kontinuierlich zunehmen, ohne dass ein Bezug zur Baurichtung besteht. Neben der Geometrie des Features selber, muss bei der Platzierung somit auch eine Leitkurve als Referenz gewählt werden. Bezüglich dieser Leitkurve kann die Verteilung dann beschrieben werden. Für das Beispiel in Abb. 6-36 soll die Dichte vom Start bis zum Ende der Leitkurve von 66,7 % auf 100 % der Maximaldichte ρ_{max} zunehmen. In Kombination mit dem Trajektionsparameter *trajpar*, der entlang der Leitkurve von null bis eins läuft, kann die lokale Dichte ρ_{lokal} dann wie folgt beschrieben werden:

$$\rho_{lokal} = \rho_{max} \left(\frac{1}{3} \text{trajpar} + \frac{2}{3} \right) \quad (6.1)$$

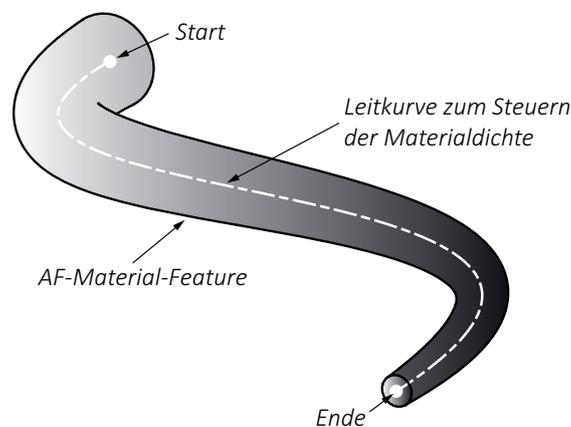


Abb. 6-36: AF-Materialfeature mit kontinuierlicher Änderung der Dichte

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Rahmen der CAD-Modellierung festgelegt wird, wo welches Material mit welcher Ausrichtung platziert werden soll. Die eigentliche Materialdefinition erfolgt in einer Datenbank, deren Informationen in Folge bei der Schichtdatengenerierung genutzt werden, um diese entsprechend den Materialeigenschaften umzusetzen.

6.2.2.3 Gitter- und Leichtbaustrukturen

Das definierte Erzeugen von Strukturen ist im Hinblick auf den Demonstrator eine Anforderung an die zu entwickelnde Lösung. Insbesondere für die Generierung von gezielter Porosität zur Verbesserung der Filmkühlung wird ein Lösungsansatz entwickelt. Weitere Schwerpunkte sind die Generierung dünnwandiger Leichtbaustrukturen für die optimierte Gestaltung der Kühlluftführung im Schaufelinneren sowie die AF von Filterstrukturen.

Unabhängig von der CAD-Umgebung sind verschiedene Softwarelösungen bekannt, die Leichtbaustrukturen u. Ä. umsetzen können. Dies erfolgt jedoch nach aktuellem Stand der Technik basierend auf dem STL-Datensatz (vgl. Abschnitt 5.4.2). Der hier entwickelte Ansatz beschreibt eine Vorgehensweise, mit deren Hilfe die Informationen dem CAD-Modell aufgeprägt werden können.

Grundlage der Entwicklung sind Untersuchungen, die an der UDE in Kooperation der Lehrstühle für Fertigungstechnik und Rechnereinsatz in der Konstruktion durchgeführt wurden. Diese haben gezeigt, dass die Erzeugung von definierter Porosität für metallische AF-Bauteile möglich ist. Grundlegende Ansätze dazu beschreibt Sehart in seiner Dissertation [Se10]. Basierend auf dem von Sehart beschriebenen Lösungskonzept (nachfolgend Methode 1 genannt), die Porosität für Filterstrukturen durch Anpassung der Belichtungsparameter zu erreichen, wurde ein Konzept entwickelt, dass durch gezielte Programmierung der einzelnen Belichtungspfade definierte Gitterstrukturen für Filterelemente erzeugt [SeMa12], [SeMa14] (nachfolgend Methode 2 genannt). Diese Vorgehensweisen können prinzipiell auf den hier betrachteten Anwendungsfall übertragen werden.

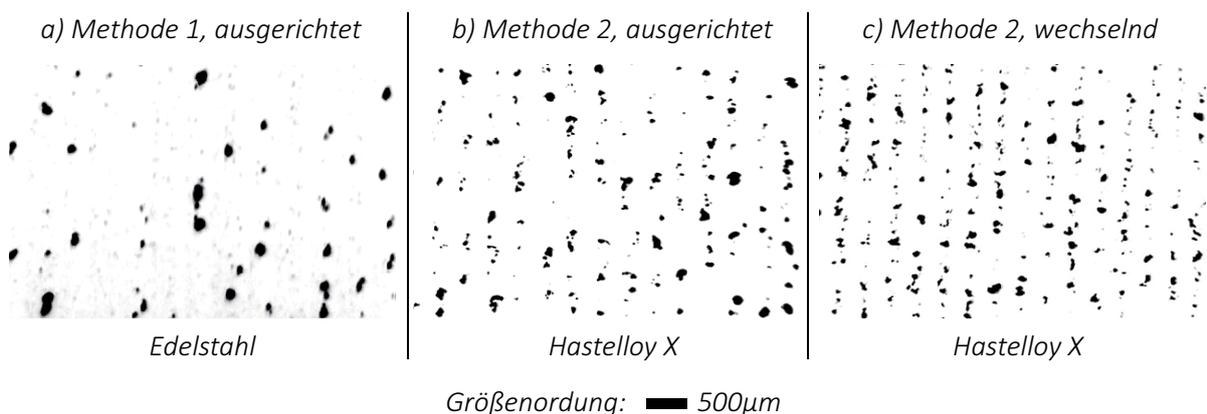


Abb. 6-37: Negativdarstellung gefertigter Filterstrukturen nach [SeMa12]

Die Evaluierung der so erzeugten Strukturen hat ergeben, dass die Methode 2, mit den exakt definierten Belichtungspfaden, fortgeschrittene Ergebnisse im Vergleich zur Methode 1 liefert. In Abb. 6-37 ist das Ergebnis dargestellt. Es handelt sich je um die

laterale Sicht auf dünne Wände in Negativdarstellung. Die Poren sind jeweils als schwarze Bereiche zu erkennen. Die Abbildung zeigt so im ersten Bild a) die nach Methode 1 gefertigte Gitterstruktur eines Edelstahlbauteils. Als Belichtungsstrategie wird eine Hatch-Belichtung genutzt. Hierbei alternieren die Scanlinien schichtweise in X- und Y-Richtung, wobei diese immer genau übereinander ausgerichtet werden. Der Vorteil der Methode 2 zeigt sich in Abbildung Abb. 6-37 b), wo prinzipiell dieselbe Belichtungsstrategie wie in a) gewählt wurde. Im Gegensatz zu a) erfolgt dies jedoch nicht über die anlagenseitig verfügbaren Hatch-Parameter, sondern durch eigens definierte Belichtungspfade. Dies hat den Vorteil, dass so auch der Fokusbereich des Lasers reduziert werden kann, was zu einer optimierten Ausprägung der Poren führt. Noch bessere Ergebnisse lassen sich erreichen, wenn keine rein alternierende X-Y-Belichtung gewählt wird. So zeigt Abb. 6-37 c), dass durch schichtweise Anpassung der Linienabstände, Winkel und Laserleistung das Gesamtergebnis weiter verbessert werden kann. Für diesen Fall wird für die erste und zweite Schicht eine wie in Fall a) und b) genutzte X-Y-Gitterbelichtung gewählt. In der folgenden dritten Schicht wird der Abstand der Y-Scanlinien jedoch um ein Viertel im Vergleich zum Abstand der ersten Schicht variiert. Dies sichert eine gleichmäßigere Wärmeübertragung zur Bauplatte bzw. zu den unterliegenden Schichten. Als Ergebnis werden gleichmäßigere Poren in Größe und Verteilung erreicht [SeMa12].

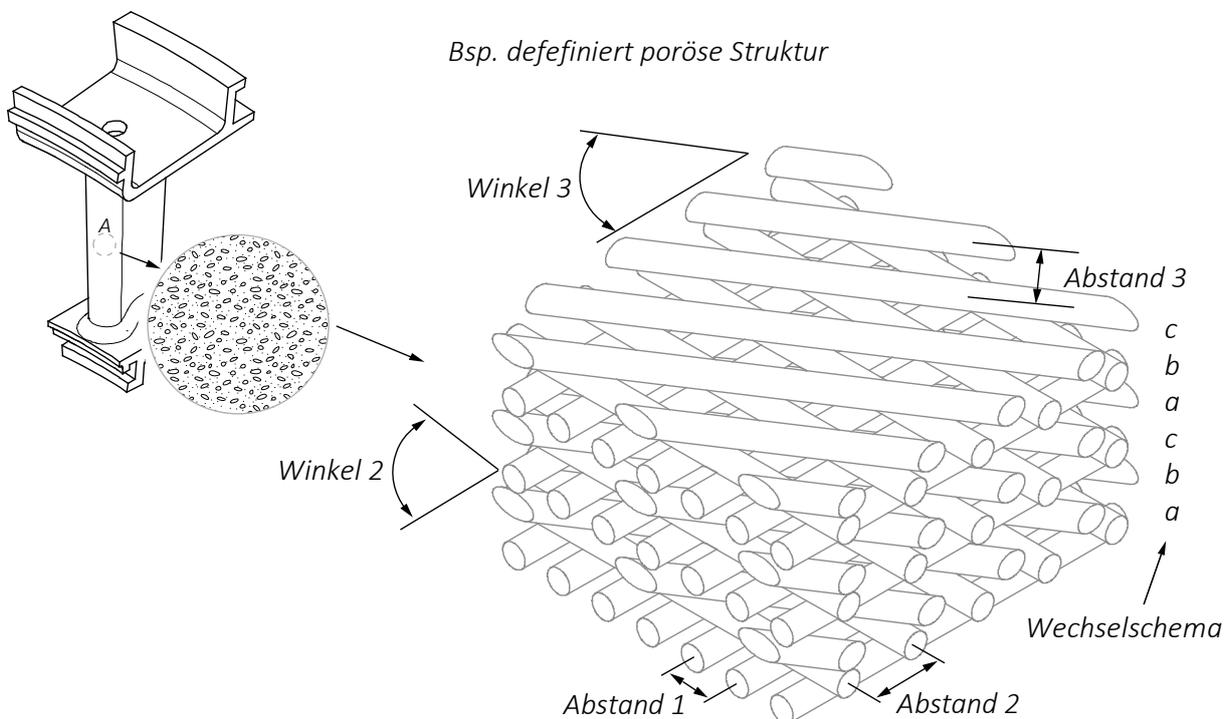


Abb. 6-38: Parameter zur Beschreibung von porösen Gitterstrukturen

Beispielhaft zeigt die Abb. 6-38, wie die Definition einer porösen Struktur parameterbasiert erfolgen kann. Es werden für verschiedene Schichten die Abstände der

Scanlinien und die Winkelausrichtung definiert. Ein vorgegebenes Wechselschema gibt die Kombination der jeweiligen Schichten vor.

Mit dieser Methode werden verschiedene poröse Strukturen evaluiert, deren Parameter dann in der an AMC gekoppelten Datenbank gespeichert werden. Über eine Zuweisung zu den zuvor gekennzeichneten Bereichen kann so bereichsweise Porosität in das Bauteil eingebracht werden.

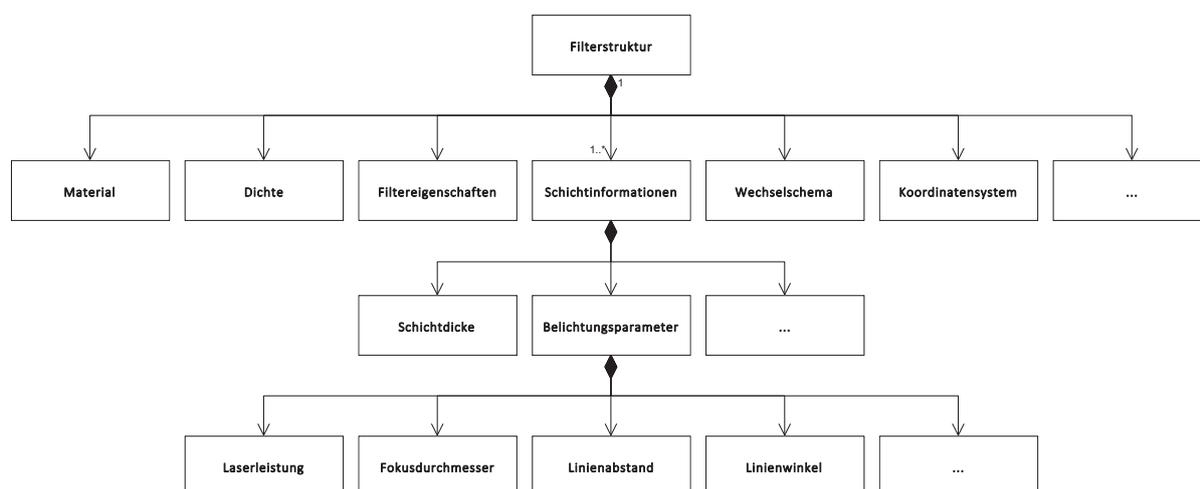


Abb. 6-39: Aufbau einer Filterstruktur in der Datenbank

Auch die Porosität wird, vergleichbar mit den gradierten Materialeigenschaften, nicht im Detail im CAD-Modell abgebildet, da dies die Rechenkapazitäten überfordert. Das CAD-Modell erhält die für die Modellierung notwendigen Informationen aus der Datenbank (vgl. Abb. 6-39). Dies ist vor allem die gemittelte Dichte der porösen Struktur. So können im Modellierungsprozess nützliche Funktionen, z. B. die schwerpunktoptimierte Gestaltung, weiter genutzt werden. Umgesetzt wird die Struktur bei der abschließenden Schichtdatengenerierung.

Leichtbaustrukturen lassen sich prinzipiell wie Filterstrukturen aufbauen. Auch hier profitiert die Umsetzung von der Möglichkeit, Wände der minimalsten Wanddicke (einfacher min. Fokusdurchmesser) herzustellen. Sind die Leichtbaustrukturen durch Wiederholgeometrie (z. B. Bienenwabenstrukturen) geprägt, kann dasselbe Prinzip wie bei den Filterstrukturen angewendet werden. Die Datenbank beinhaltet zudem die Beschreibung der Struktur auf der Schichtebene. Im CAD-Modell werden nur die Bereiche gekennzeichnet, die mit der Struktur versehen werden und die Umsetzung erfolgt dann im Rahmen der Schichtdatengenerierung. Funktionierende Teillösungen können hier insbesondere aus bereits vorhandenen Softwarelösungen übernommen bzw. gekoppelt werden (vgl. Abschnitt 5.4.2).

Neben dieser Möglichkeit können Leichtbaustrukturen auch als AF-Feature nach 6.2.1 ausgeführt werden. Dies ist immer dann eine sinnvolle Lösung, wenn es sich nicht um

kleinteilige Wiederholgeometrie handelt, sondern um größere Strukturen, wie dünnwandige Verrippungen u. ä. Dies wird insbesondere durch die direkte Schichtdatengenerierung ermöglicht (Details dazu werden im Abschnitt 6.2.3 ausgeführt). Durch Substitution des STL-Exportvorgangs können auch die damit verbundenen Gestaltungsregeln vernachlässigt werden. Eine dieser Regeln ist es, nur geschlossene Volumengeometrie zu modellieren. Der hier entwickelte Ansatz sieht auch die Möglichkeit vor, dünnwandige Geometrie, wie z. B. einzelne Flächen, in Schichtdaten zu überführen. Somit können mindestens um die Hälfte schmalere Wände gefertigt werden, als mit der herkömmlichen auf STL basierenden Methode.

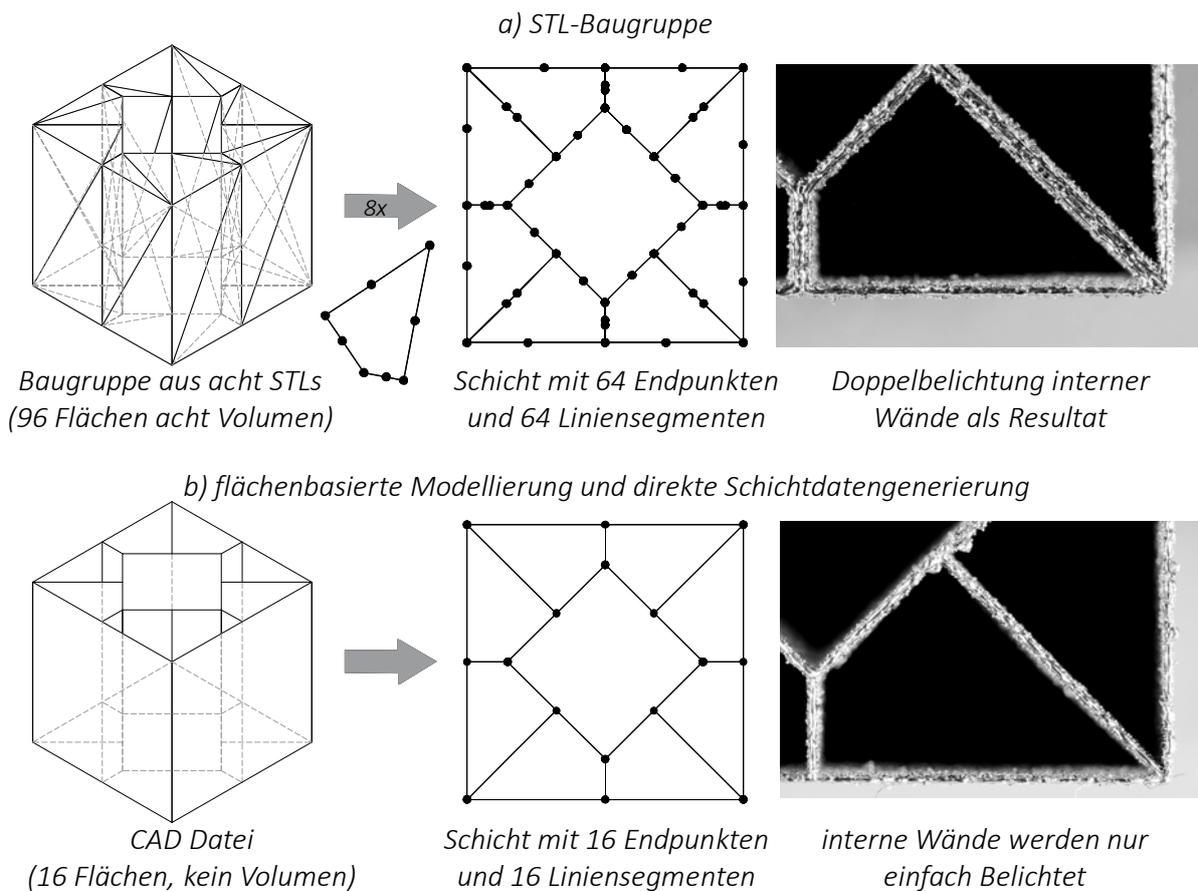


Abb. 6-40: Leichtbau durch flächenbasierte AF-Features

Ein Beispiel für die Umsetzung im Vergleich zur herkömmlichen, STL-basierten Vorgehensweise ist in Abb. 6-40 dargestellt. Die Abbildung zeigt den Aufbau einer dünnwandigen Struktur, die nur aus Flächen bestehen soll. Werden STLs genutzt, muss dazu der Umweg über eine Baugruppe mit Einzelteilen gegangen werden, da die Modellierung auf andere Weise nicht erfolgen kann. In der prozessvorbereitenden Software werden dann nur die Konturen dieser zusammengesetzten Bauteile zum Belichten selektiert. Alternativ ist mit dem Ansatz der direkten Schichtdatengenerierung ein einfacherer Weg möglich. Die Gestaltung kann so als Flächenmodell in der CAD-Umgebung erfolgen. Exportiert werden dann entsprechend die Schnitte mit diesem

Modell als Schichtdaten. Das Ergebnis ist die Verringerung der Wanddicke interner Wände um die Hälfte, da so eine Doppelbelichtung vermieden wird.

6.2.3 Direkte Schichtdatengenerierung

Der Ansatz der direkten Schichtdatengenerierung besteht aus zwei hauptsächlichen Komponenten. Dies ist zum einen ein neutrales Format, das die Schichtdaten austauschen kann. Zum anderen sind es Lösungen, die in das CAD-System implementiert werden müssen, um die Schichtdaten zu exportieren. Für beide Fälle wird ein Lösungsansatz in den folgenden Abschnitten erläutert.

6.2.3.1 Schichtdatenformat AMLF

Die bestehenden Schichtdatenformate erweisen sich für die Übertragung aller relevanten Bauteil- und Schichtinformationen, insbesondere bei Multimaterialbauteilen, als unzureichend. Für eine bedarfsgerechte Schichtdatenübertragung wird im Rahmen dieser Arbeit ein Vorschlag für ein neues Schichtdatenformat entwickelt. Das *Additive Manufacturing Layer File Format (AMLF)* ist in Anlehnung an das AMF-Format in Kombination mit dem CLI-Format entwickelt worden. Es berücksichtigt insbesondere die in Abschnitt 4.2.2 ermittelten Anforderungen an AF-Datenformate. Die Ähnlichkeit zum AMF-Format ist in der übergeordneten Struktur von AMLF bereits zu erkennen, die der AMF-Struktur weitestgehend entspricht (vgl. Abb. 6-41). Enthalten sind so die übergeordneten Elemente Einheit, Metadaten, Materialien, Objekte und Anordnung. AMLF wird wie AMF als XML-Format konzipiert.

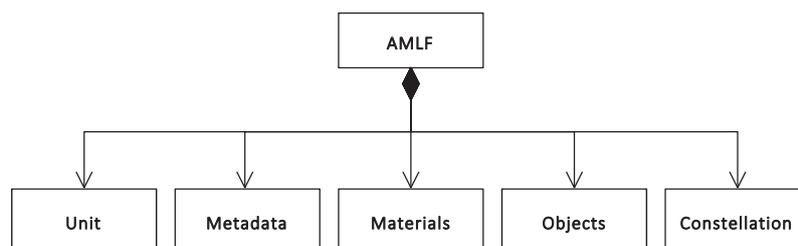


Abb. 6-41: AMLF-Struktur

Im XML-Format ergibt sich die Grundstruktur wie folgt³⁹:

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<amlf unit="mm">
  <metadata type="Company">Universität Duisburg-Essen</metadata>
  <metadata type="CAD-System">PTC Creo 3.0</metadata>
  <metadata type="DrawingNumber">2015-05-02</metadata>
  <metadata type="Designer">HSM</metadata>
  <materials>...</materials>
  <objects>...</objects>
  <constellation>...</constellation>
</amlf>
  
```

³⁹ Hinweis: Im Anhang Abb. 8-18 ist ein zusammenhängendes Beispiel für eine AMLF-Datei abgebildet.

Der Quellcode beinhaltet bereits Angaben zur verwendeten Einheit und exemplarische Metadaten im Metadaten-Element. Das Metadaten-Element kann auch untergeordnet in jedem der anderen Elemente genutzt werden, um erforderliche Metadaten zu ergänzen.

In dem Material-Element werden die genutzten Materialien definiert. Dazu wird jedes neue Material mit einer eindeutigen ID versehen, sodass eine eindeutige Zuweisung erfolgen kann. Das Blockdefinitionsdiagramm in Abb. 6-42 zeigt die weiteren enthaltenen Elemente, wie die Materialbenennung, die Dichte und den Materialtyp. Der Typ wird hierbei aus den drei Kategorien dichtes, strukturiertes und gradiertes Material gewählt. Weitere Metadaten zu Materiallieferant, Kurzname, Werkstoffnummer und Kurzbeschreibung ergänzen das Material.

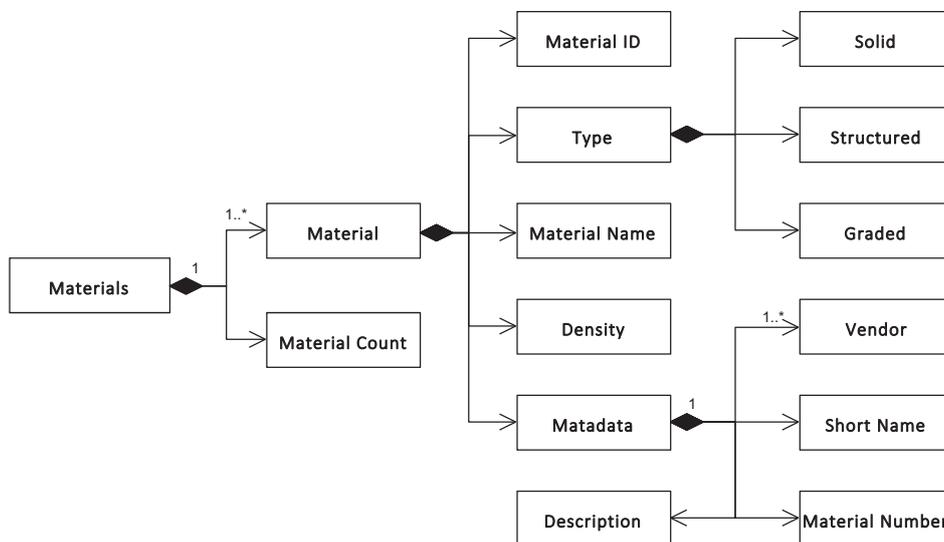


Abb. 6-42: Beschreibung der Materialien mit AMLF

Der exemplarische XML-Quellcode für ein Edelstahlmaterial der Firma EOS wird wie folgt definiert:

```

<materials count="1">
  <material id="356">
    <metadata type="Vendor">EOS</metadata>
    <metadata type="Short Name">X5CrNiCuNb16-4</metadata>
    <metadata type="Material Number">1.4542</metadata>
    <metadata type="Description">Edelstahl</metadata>
    <name>EOS StainlessSteel GP1</name>
    <type>Solid</type>
    <density unit="g/cubic cm">7.8</density>
  </material>
</materials>
  
```

Durch die Anbindung an die AMC-Datenbank können die genauen Ausprägungen des Materials, z. B. die Parameter der porösen Gitterstruktur, anhand der Material-ID ermittelt werden. So kann der Algorithmus der Pfadgenerierung diese Informationen nutzen, um die gewünschten Bereichseigenschaften zu erreichen.

Die eigentliche Schichtgeometrie wird in dem Objekt-Element gespeichert (siehe Abb. 6-43). Ein Objekt-Element ist, genau wie beim AMF-Format, immer für die Beschreibung eines AMLF-Datensatzes erforderlich. Alle anderen Elemente können optional wegfallen, was jedoch zu einer beschränkten Aussagefähigkeit und Nutzbarkeit der Datei führt. Die Objekte, die eigenständige Bauteile repräsentieren, werden über eine eindeutige ID referenziert. Zusätzlich findet eine Benennung statt. Die Anzahl der Schichten wird ebenso erfasst, wie eine achsenorientierte Boundingbox zur Beschreibung der Maximalabmessungen. Dabei wird das Koordinatensystem immer in der linken unteren Ecke der Boundingbox platziert, um alle weiteren Werte positiv definieren zu können.

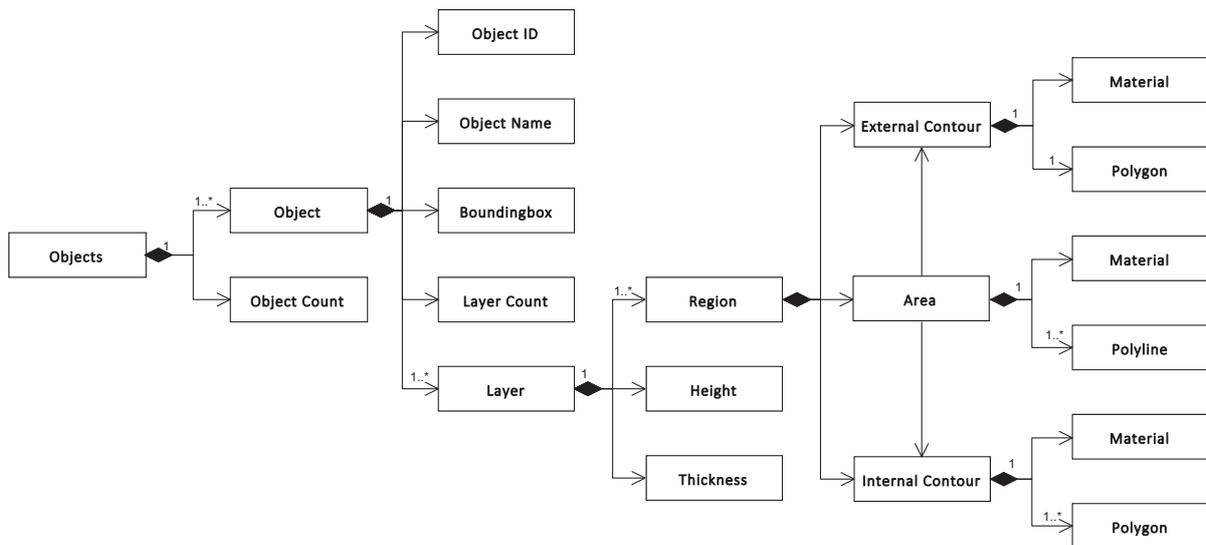


Abb. 6-43: Beschreibung der Objekte mit AMLF

Der beispielhaft definierte Quellcode für einen Würfel mit 10 mm Kantenlänge und 0,1 mm Schichtdicke wird demnach entsprechend abgebildet:

```

<objects count="2">
  <object id="001">
    <name>Wuerfel</name>
    <boundingbox>
      <bottomleft>
        <x>0</x><y>0</y><z>0</z>
      </bottomleft>
      <topright>
        <x>10</x><y>10</y><z>10</z>
      </topright>
    </boundingbox>
    <layercount>100</layercount>
    <layer height="0.1">
      <layerthickness>0.1</layerthickness>
    </layer>
    ...
    <layer height="10">
      <layerthickness>0.1</layerthickness>
    </layer>
  </object>
  <object id="002">
    ...
  </object>
</objects>

```

Das Region-Element dient dazu, Bereiche eines Bauteils mit unterschiedlichen Materialien in einer Schicht abzugrenzen und beinhaltet gleichzeitig die Konturinformationen. Für den Würfel mit 10 mm Kantenlänge und einer quadratischen 5 mm großen Öffnung in der Mitte werden die interne und die externe Kontur wie folgt definiert:

```
<layer height="0.1">
  <layerthickness>0.1</layerthickness>
  <region>
    <externalcontour>
      <material>366</material>
      <polygon>
        <coordinates>0,0,10,0,10,10,0,10,0,0</coordinates>
      </polygon>
    </externalcontour>
    <area>
      <material>356</material>
    </area>
    <internalcontour>
      <material>366</material>
      <polygon>
        <coordinates>2.5,2.5,2.5,7.5,7.5,7.5,7.5,2.5,2.5,2.5</coordinates>
      </polygon>
    </internalcontour>
  </region>
</layer>
```

Die zu belichtende Fläche ergibt sich somit aus der externen und der internen Kontur. Die Konturen werden, vergleichbar wie beim CLI-Format, als Polygone mit Kommagetrennten X- und Y-Koordinatenwerten definiert. Durch die im Format enthaltene Differenzierung von internen und externen Konturen ist eine Vorgabe der Drehrichtung nicht zwingend erforderlich. Um einen CLI-Datenaustausch zu vereinfachen, werden die Punkte der externen Polygone gegen den Uhrzeigersinn gelistet, die der internen im Uhrzeigersinn. Start- und Endpunkt sind hierbei immer identisch. Die Materialzuweisung steuert weitere Vorgaben. In diesem Beispiel ist exemplarisch das zuvor definierte Material 356 mit Flächenbelichtungsparametern in der Datenbank gespeichert. Das Material 366 soll hingegen Konturbelichtungsparameter beschreiben. Da in dem Flächen-Element neben dem Material keine weiteren Angaben vorhanden sind, wird die Fläche vollständig belichtet. Entfällt das Flächen-Element, findet nur eine Konturbelichtung statt. Externe Konturen können einfach, interne mehrfach je Region auftreten.

Darüber hinaus kann das Flächen-Element weitere Polylinien enthalten, die z. B. eine Gitterstruktur repräsentieren. Werden diese ausgewiesen, findet automatisch keine vollständige Belichtung der Fläche mehr statt. Polylinien werden genau wie Polygone durch kommagetrennte Werte beschrieben, enthalten jedoch nicht denselben Start- und Endpunkt. Die umschließenden Konturen können diesbezüglich auch entfallen. So kann eine Gitterstruktur mit einzelnen Polylinien z. B. wie folgt beschrieben werden:

```

<region>
  <area>
    <material>357</material>
    <polyline>
      <coordinates>0,0,0,10</coordinates>
    </polyline>
    <polyline>
      <coordinates>0.1,10,0.1,0</coordinates>
    </polyline>
    ...
    <polyline>
      <coordinates>10,0,10,10</coordinates>
    </polyline>
  </area>
</region>

```

Bezogen auf die Kontur- und Polylinienbeschreibung kann zukünftig eine Erweiterung in der Form erfolgen, dass neben Polygonen und Polylinien auch Kreissegmente, Splines u. ä. definiert werden. Dazu muss jedoch erst die Anlagensoftware so umgestaltet werden, dass entsprechende Segmente auch für die Belichtung genutzt werden können. Für das Beispiel Kreis mit einem Mittelpunkt und Radius wird ein Konturelement dann mit diesen Angaben definiert:

```

<circle>
  <center>3.5,2.7</center>
  <radius>5.87</radius>
</circle>

```

In einer Schicht können beliebig viele Regionen definiert werden, wobei jede Region letztlich einen Bereich des Bauteils mit verschiedenen Materialeigenschaften beschreibt oder es sich um in der Schicht physikalisch getrennte Bereiche desselben Bauteils handelt. Neue Bauteile werden wiederum als eigenes Objekt-Element definiert. Hier wird dann mit dem Anordnungs-element die Position der Bauteile zueinander beschrieben.

In dem Blockdefinitionsdiagramm in Abb. 6-44 ist dies dargestellt. Das Diagramm zeigt auch, dass mehrere Instanzen eines Bauteils genutzt werden können. Jede Instanz erhält hierbei eine eigene ID zur eindeutigen Identifizierung. Damit verknüpft werden ebenfalls die entsprechende Objekt-ID sowie die in dem Objekt genutzten Schichtdicken. So kann bei der Platzierung sichergestellt werden, dass die verschiedenen Schichten der Objekte deckungsgleich angeordnet werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht auch, dass ein Objekt feiner als ein benachbartes aufgelöst wird. So müssen in Anlehnung an den Ansatz von Tyberg und Bøhn nicht alle Objekte dieselben Schichtdicken aufweisen (vgl. 5.3.2.2). Bedingung hierfür ist nur, dass die größeren Schichtdicken jeweils ein Vielfaches der kleineren Schichtdicken sind.

Die Position der einzelnen Instanzen wird relativ zu der zuerst platzierten Instanz definiert. Dabei dienen die über die Boundingboxen der jeweiligen Objekte definierten Koordinatensysteme als Referenz. Angegeben werden immer eine X-Y-Z-Translation und die Rotation um die Z-Achse in Bezug auf das Maschinenkoordinatensystem. Dessen Position ist definitionsgemäß die untere linke Ecke der Bauplattform.

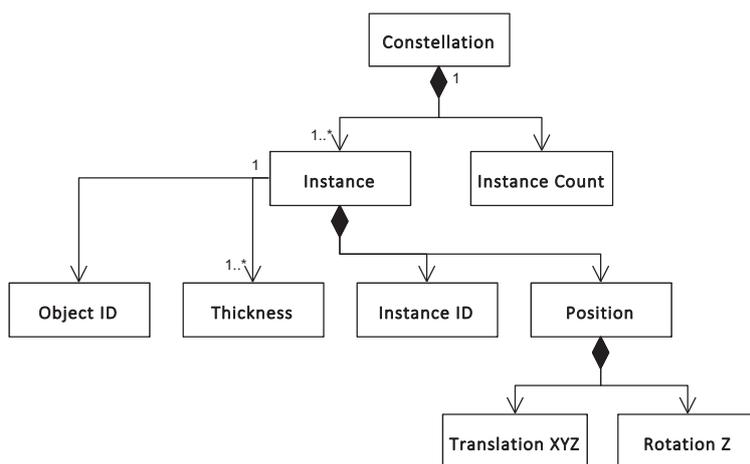


Abb. 6-44: Beschreibung der Anordnung mit AMLF

Der nachfolgende Dateiausschnitt zeigt wie zwei Instanzen desselben Modells platziert werden. Die genutzten Schichtdicken sind 0,02 mm und 0,04 mm.

```

<constellation instances="2">
  <instance id="001">
    <objectid>001</objectid>
    <thickness>0.02</thickness>
    <thickness>0.04</thickness>
    <position>
      <translation>
        <x>5</x>
        <y>5</y>
        <z>0</z>
      </translation>
      <rotation>0</rotation>
    </position>
  </instance>
  <instance id="002">
    <objectid>001</objectid>
    <thickness>0.02</thickness>
    <thickness>0.04</thickness>
    <position>
      <translation>
        <x>15</x>
        <y>8</y>
        <z>0</z>
      </translation>
      <rotation>45</rotation>
    </position>
  </instance>
</constellation>

```

Das so verfügbare Datenformat soll sicherstellen, dass die exportierten Schichtdaten mit AF-spezifischer CAM-Software weiterverarbeitet werden können. So kann nach Integration einer Importfunktion auf der CAM-Seite die Generierung oder Anpassung von Stützkonstruktionen, die Optimierung der Verschachtelung und die exakte Prozessplanung durchgeführt werden. Im Anhang 8.3 ist eine vollständige AMLF-Beispieldatei dargestellt.

6.2.3.2 Direkte Schichtdatengenerierung

Eine der in der Literatur genannten grundsätzlichen Problematiken der Schichtzerlegung ist der Schnitt der Schichtebene mit der Geometrie zur Ermittlung der Durchdringungspunkte (vgl. 5.3). Da sich diesbezüglich für STL-Daten die Schichtdatengenerierung noch als vergleichsweise einfach darstellt, ist dies einer der Gründe für die STL-Etablierung zum Datenaustausch in der AF (vgl. 2.2.1.4).

Jedes leistungsfähige 3D-CAD-System verfügt hingegen über die Funktionen zum Schneiden von Geometrie mit Flächen oder Ebenen und der Ableitung resultierender Schnittkurven. In Abb. 6-45 ist dargestellt, wie die schnittbasierte Schichtdatengenerierung und der Export der Schnittkonturen im IGES-Format mit *PTC Creo* durchgeführt werden kann. Für die Integration einer Schichtdatengenerierung in die 3D-CAD-Software müssen somit die vorhandenen Algorithmen nur entsprechend den neuen Anforderungen angepasst werden.

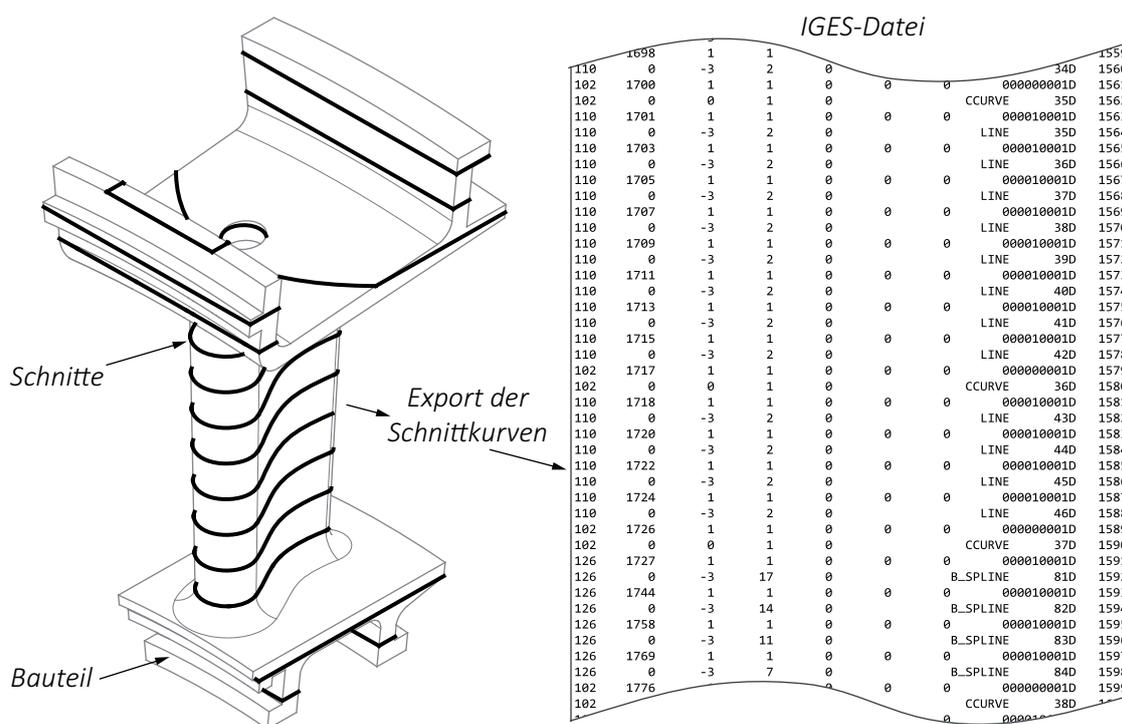


Abb. 6-45: Schnittkurvengenerierung und Export mit *Creo*

Auch die zuvor im Recharteil der Arbeit beschriebene non-manifold Problematik bei Schnitten an kritischen Stellen (vgl. 5.3) kann in den neuen Versionen der genutzten 3D-CAD-Systeme als gelöst betrachtet werden. Schnitte an entsprechenden Stellen des Bauteils stellen für die internen Algorithmen kein Kriterium mehr dar, das einen Abbruch oder eine mangelnde Regenerierbarkeit bedeutet. Somit kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die reine Erzeugung und der Export von Schnittkonturen mit den vorhandenen 3D-CAD-Systemen möglich ist. Der vorgese-

hene Ablauf, der die Schichtdatengenerierung im CAD-System durchführt, ist in Abb. 6-46 dargestellt.

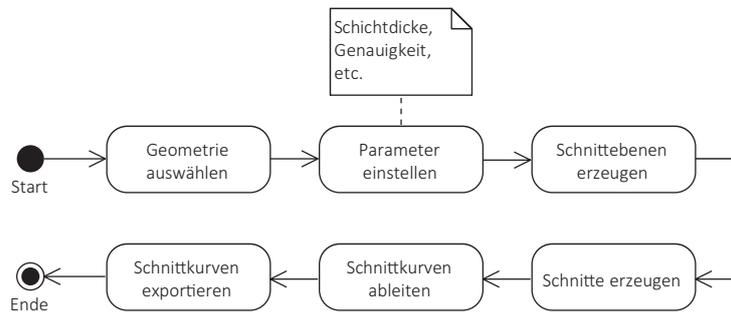


Abb. 6-46: CAD-basierte Schichtdatengenerierung

Um die Schichtdatengenerierung vollständig zu implementieren müssen Lösungsansätze für die folgenden Fragestellungen ergänzt werden:

- 1) *Wie erfolgt die Approximation der Schnittkonturen als Polygone und Polylinien?*
- 2) *Wie werden die im Bauteil gekennzeichneten Materialbereiche und Strukturen übernommen?*
- 3) *Wie werden Ansätze der adaptiven Schichtzerlegung implementiert?*

Die Beantwortung der ersten Frage ist derzeit noch ein wesentlicher Punkt. Die derzeitige Fertigungstechnologie benötigt Polygone und Polylinien für die AF. Daher müssen die in heterogener Form vorliegenden Schnitte, die aus allen bekannten Skizzenelementen, wie Gerade, Kreissegment, Spline etc., bestehen, so umgewandelt werden, dass keine „gekrümmten“ Segmente verbleiben. Dieser Schritt muss darüber hinaus in Abhängigkeit einer gewählten Genauigkeit erfolgen, da hiermit maßgeblich die Qualität der Schichtdaten beeinflusst wird.

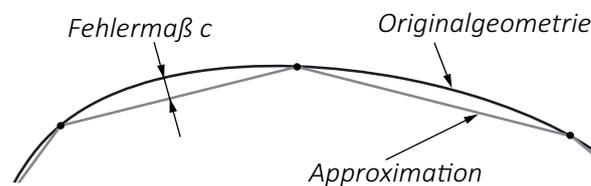


Abb. 6-47: Fehlermaß c zur Quantifizierung der Abweichung

Die Berechnung der Approximation von Polylinien kann nach einem ähnlichen Konzept wie dem CHC von Dolenc und Mäkelä erfolgen (vgl. 5.3.2.1). Es wird ein Fehlermaß c ähnlich der Fehlerspitzenhöhe definiert, das den maximalen sehnenförmigen Abstand des erzeugten Gradenelements von der Ursprungsgeometrie beschreibt

(Abb. 6-47). Wird dieses Fehlermaß erreicht, wird ein neues Geradensegment erzeugt. So werden alle kurvenförmigen Elemente schrittweise als Polygon approximiert.

Die Approximation kann auch mit bereits in der CAD-Software vorhandenen Algorithmen erfolgen. Darüber hinaus sind vielfältige weitere Lösungsansätze für diese Problemstellung bekannt, z. B. in Anwendungen zur Verarbeitung von Vektorgrafiken, die an dieser Stelle nicht tiefergehend erläutert werden. In Abb. 6-48 ist die Approximation einer Schnittkontur dargestellt. Die Abbildung zeigt auch, wie es möglich ist, durch Anpassung der Parameter die Genauigkeit zu beeinflussen.

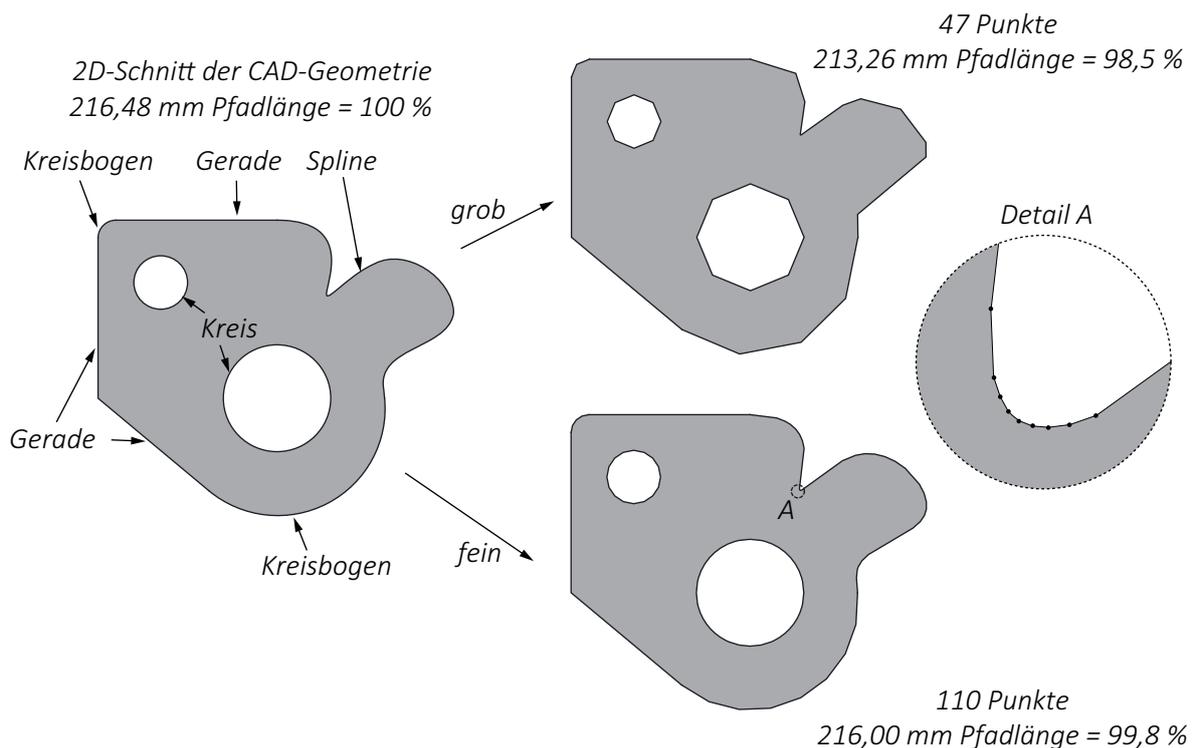


Abb. 6-48: Approximation der Schnittkontur durch Polylinien

Der Approximationsschritt ist in den Ablauf der Schichtdatengenerierung, wie in Abb. 6-49 gezeigt, eingebunden. Für jede Schicht und Schnittkontur wird skizzenelementweise vorgegangen. Handelt es sich bei dem Element um eine Gerade, wird geprüft, ob Start und Endpunkt bereits durch zuvor verarbeitete Elemente in einer Punkteliste erfasst worden sind. Alle Punkte erhalten eine eindeutige ID, um diese dann im folgenden Schritt einem Geradensegment zuordnen zu können. So werden redundant gespeicherte Punkte im Programmablauf ausgeschlossen und das Fehlerpotenzial reduziert. Eine Gerade V_i wird so durch die Endpunkte P_1 und P_2 beschrieben. Dieselbe Prüfung wird auch schrittweise für die approximierten Polylinien durchgeführt. So wird jedes Geradensegment einer Polylinie in der Form einer Geraden als V_i mit den Start- und Endpunkten P_m und P_n in der Liste der Geradensegmente gespeichert. Über die Zuordnung der Punkte zu einzelnen Segmenten entsteht so ein topologischer Zusammenhang, der die nach dem letzten Skizzenelement erfolgende

Prüfung auf Konsistenz erleichtert. Abschließend ergibt sich durch Aneinanderreihung eine Polylinie oder ein Polygon.

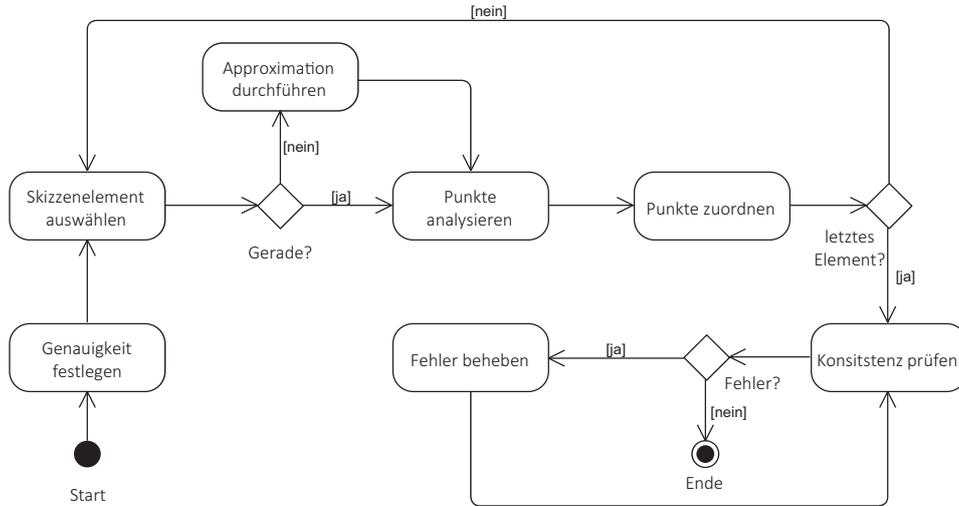


Abb. 6-49: Verarbeitung der Schnittkonturen als Aktivitätsdiagramm

Für die zweite Fragestellung bezüglich der Berücksichtigung von Materialbereichen und Strukturen sieht der Lösungsansatz eine materialbereichsweise Vorgehensweise vor. Hier zeigt die Abb. 6-50 die prinzipielle Vorgehensweise. Basierend auf den zuvor für das gesamte Bauteil ermittelten Schichthöhen werden die jeweils gekennzeichneten Materialbereiche nacheinander in die AMLF-Schichtdatenstruktur überführt.

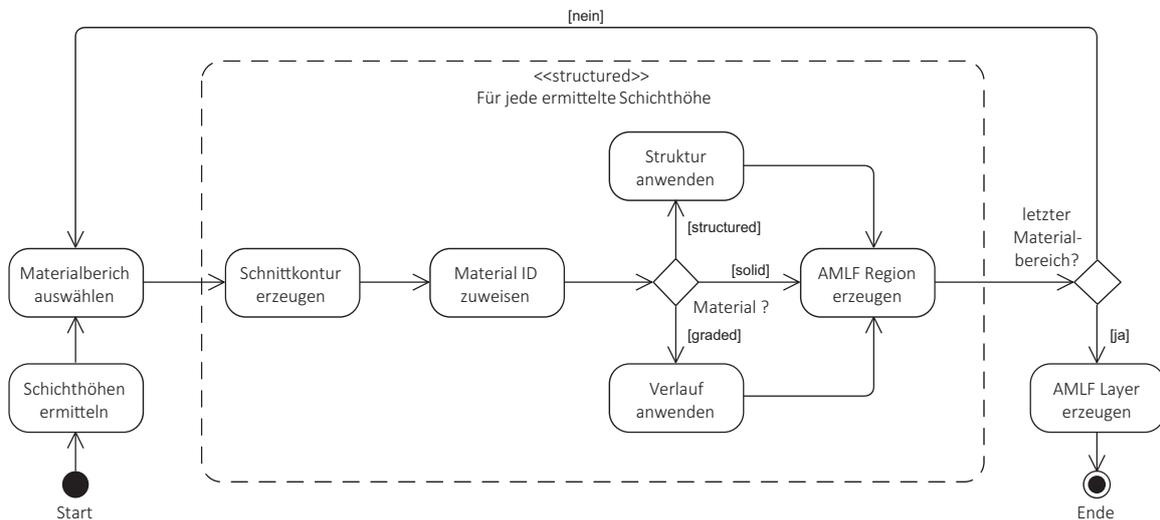


Abb. 6-50: Materialbereichsweise Schichtdatenerzeugung

Da die Schichthöhen vorher definiert werden, ist sichergestellt, dass die einzelnen Materialbereiche nachfolgend als ein Bauteil gefertigt werden können. So werden für jeden Materialbereich zuerst die Schnittkonturen in der jeweiligen Schicht ermittelt, sofern dies noch nicht vorher durch eine bereichsweise-adaptive Schichtzerlegung erfolgt ist. Dann werden die Materialinformationen aus dem Modell über die Material-

ID mit dem Schichtbereich verknüpft. Handelt es sich um ein dichtes Material, können direkt die für die AMLF-Region erforderlichen Informationen zu externen und internen Konturen und dem Füllbereich definiert werden. Handelt es sich z. B. um ein strukturiertes Material wird der Füllbereich in der AMLF-Region mit den entsprechenden Polylinien zum Abbilden einer Gitterstruktur o. ä. definiert. Diese Schritte erfolgen für jeden Materialbereich in jeder Schicht. Ist dies für alle Materialbereiche abgeschlossen, werden die zu den jeweiligen Schichthöhen gesammelten Regionen schichtweise zu AMLF-Layern zusammengefasst, bis das Objekt komplett beschrieben ist.

Die Ermittlung der Schichthöhen erfolgt entweder durch die Vorgabe einer uniformen Schichtdicke durch den Benutzer oder bereichsweise-adaptiv. Eine voll-adaptive Schichtzerlegung wird aus prozesstechnischen Gründen verworfen. Als bereichsweise-adaptiv wird in diesem Zusammenhang die Vorgehensweise betrachtet, bei der das Bauteil in Baurichtung in Bereiche mit unterschiedlichen Schichtdicken zerlegt wird, und nicht wie bei der voll-adaptiven Schichtdatengenerierung jede aufeinanderfolgende Schichtdicke wechseln kann. Die bereichsweise-adaptive Schichtdatengenerierung setzt daher voraus, dass durch den Fertigungstechnologen technologisch sinnvolle Schichtdicken für den Prozess definiert worden sind. Diese stehen dann zur Bildung der Schichtbereiche zur Verfügung. Wie schon zuvor beschrieben, ist es erforderlich, dass es sich bei diesen Schichtdicken immer um ein Vielfaches der minimalst definierten Schichtdicke handelt, z. B. 0,01 mm, 0,02 mm und 0,04 mm. So ist sichergestellt, dass die im CAD-Modell abgebildeten Materialbereiche auch mit unterschiedlichen Schichtdicken gefertigt werden können. Auf diese Weise kann beispielsweise eine Hülle-Kern-Strategie umgesetzt werden, indem der Kern nur jede zweite Schicht einer Region abbildet, die Hülle jedoch jede Schicht.

Entsprechend dieser Vorgehensweise wird ein Top-down Ansatz der Schichtzerlegung genutzt (vgl. 5.3.2.2). Das Bauteil wird zunächst mit der maximalen Schichtdicke zerlegt. Dann erfolgt eine schrittweise Verfeinerung, wobei diese dahingehend eingeschränkt wird, dass immer Bereiche erzeugt werden, bei denen eine definierte Anzahl gleicher Schichtdicken aufeinanderfolgt. Hier wird auch vorgesehen, dass diese Bereiche auch benutzerdefiniert festgelegt werden können (vgl. 6.1.5.2).

Bedingt durch die CAD-basierte Vorgehensweise werden die nach dem CHC beschriebenen Ansätze als ungeeignet bewertet, da keine Facetten sondern Freiformflächen des Bauteils geschnitten werden. Daher wird eine konturbasierte Vorgehensweise wie bei Hayasi et al. gewählt. Im Gegensatz zu Hayasi et al. wird jedoch eine Top-down- statt einer Bottom-up-Vorgehensweise bei der Ermittlung der Schichtdicken genutzt. So kann eine Kombination mit dem Ansatz von Tyberg und Bøhn erfolgen, der es wie gefordert ermöglicht, unterschiedliche Bauteile bzw. Berei-

che mit unterschiedlichen Schichtdicken nebeneinander herzustellen (vgl. Abb. 5-21). Der Ablauf der notwendigen Aktivitäten ist in Abb. 6-51 dargestellt. Zunächst werden die zulässigen Schichtdicken vom Benutzer definiert. Dann erfolgt eine Schichtdatengenerierung mit der maximal zulässigen Schichtdicke. Die so erzeugten Konturen werden schrittweise auf zulässige Abweichungen überprüft und ggf. verfeinert. Wurde das gesamte Bauteil bearbeitet, erfolgt die Zusammenfassung zu den zulässigen Schichtbereichen. Diese sind als eine Mindestabfolge von Schichten mit gleichbleibender Schichtdicke definiert. Wird diese Mindestabfolge nicht erreicht, werden so lange gröbere durch feinere Schichten substituiert, bis dies der Fall ist. Die in diesem Rahmen erzeugten Schichtkonturen werden direkt so aufbereitet, dass eine Weiterverwendung bei der Kennzeichnung der Materialbereiche etc. erfolgen kann.

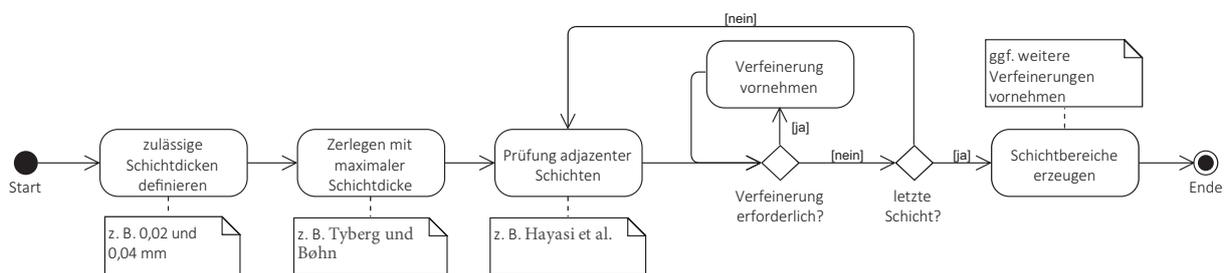


Abb. 6-51: Bereichsweise-adaptive Schichtdatenerzeugung

6.3 Integrationsstufe 3

Die dritte Integrationsstufe repräsentiert einen Ansatz für eine vollständige CAD-CAM-Integration der AF-Lösungen in einer geschlossenen Softwareumgebung. Als Idee wird gezeigt, wie die für die konventionelle Fertigung bereits verfügbaren Lösungskonzepte auch im Bereich der AF umgesetzt werden können. Grundsätzlich soll so die interdisziplinäre Zusammenarbeit auf einer Datenbasis unterstützt und vereinfacht werden. Das Ziel ist, dass sowohl der Konstrukteur als auch der Fertigungstechnologe eine Softwareumgebung nutzen, die ihren Anforderungen entsprechend strukturiert ist und die für die jeweilige Person notwendigen Werkzeuge bereitstellt. So sollen Fehler durch unnötige Datentransfers ausgeschlossen und durch umfassende Integration von Produkt- und Produktionswissen in allen an der Produktentwicklung und -Herstellung beteiligten Stellen Mehrwert geschaffen werden.

Das in Abb. 6-52 dargestellte Paketdiagramm zeigt die Module der Gesamtlösung. Die in ein gängiges CAD-System integrierte AMC-CAD-CAM-Lösung ist modular aufgebaut. Sie beinhaltet neben der Datenbank die Module zum Datenaustausch, der CAD-Modellierung und einer CAM-Umgebung zur Erzeugung der Fertigungsdaten. Die Module zum Datenaustausch und zur CAD-Modellierung umfassen die zuvor als Integrationsstufe 1 und 2 beschriebenen Teillösungen. Wesentliche Elemente sind die durch AF-Feature unterstützte und durch entsprechende Analysen abgesicherte Mo-

dellierung und die Erweiterung des Datenaustauschs um das AMLF-Schichtdatenformat.

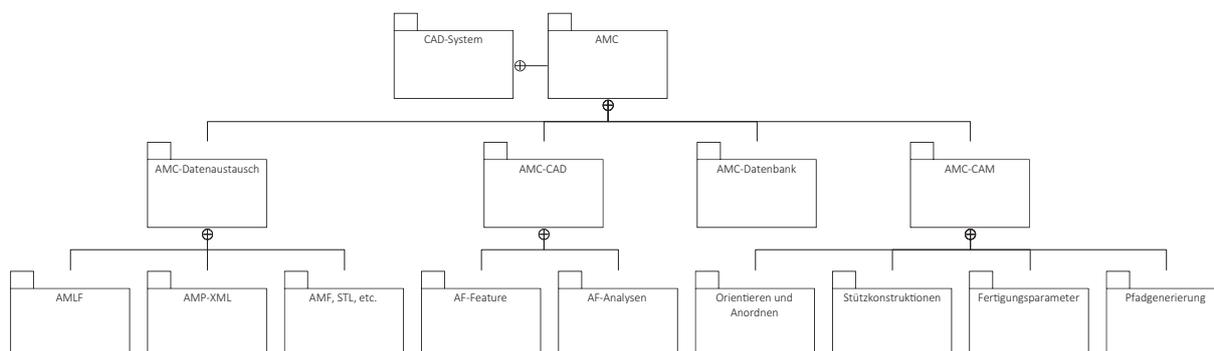


Abb. 6-52: Pakete der AMC-CAD-CAM-Gesamtlösung

Die umfassende Integration sieht die Ergänzung von CAM-spezifischen Werkzeugen zur Orientierung und Anordnung (Verschachtelung), der Erzeugung von Stützkonstruktionen, der Definition von Fertigungsparametern und letztlich der Pfadgenerierung vor. So soll als Ergebnis eine Datei, die ähnlich einer NC-Datei alle relevanten Informationen enthält, von dem CAM-Werkzeug an die Anlage übergeben werden können. Eine umfassende Programmierung dieser Lösung ist im Rahmen dieser Dissertation nicht erfolgt, die Erläuterung von Teillösungen in Kombination mit der systembasierten Modellierung werden als ausreichend für die Beschreibung des Gesamtsystems bewertet. In den folgenden Abschnitten werden die Lösungsansätze für die Teilmodule des AMC-CAM-Werkzeugs erläutert.

6.3.1 Bauteilorientierung- und Anordnung

Für die Optimierung der Bauteilorientierung existieren verwertbare Lösungen, wesentliche wurden ebenfalls an der UDE entwickelt. Besonders die von Danjou beschriebene Vorgehensweise kann auch hier implementiert werden (vgl. 5.1.1). Durch umfassende Nutzung der im CAD-System bereits vorhandenen Werkzeuge können die geometrischen Teilprobleme gelöst und mithilfe des genetischen Optimierungsalgorithmus verarbeitet werden. Ergänzt wird diese Vorgehensweise durch eine teilautomatisierte Unterstützung des Benutzers bei der Optimierung der Orientierung. Durch die zuvor erfolgte optimierte Bauteilmodellierung stehen dazu alle notwendigen Referenzen zur Verfügung. Zudem sind die Modelle so strukturiert, dass eine Neuorientierung der Geometrie erfolgen kann.

Im Bereich der Bauteilanordnung werden die bereits verfügbaren, leistungsfähigen Softwarelösungen implementiert (vgl. 5.1.2.3). Auch hier können diese so angepasst werden, dass vorhandene Fähigkeiten der CAD-Software in die Lösung einfließen. So können beispielsweise Durchdringungsprüfungen erfolgen. Dies ist erforderlich, da in dem hier beschriebenen Fall nicht mehr mit den STL-Daten, sondern mit der nativen

Geometrie gearbeitet wird, wodurch die STL-bezogenen Algorithmen entsprechend zu ersetzen sind. Die Durchführbarkeit dieser Operation wurde durch eine Integration einer AF-Packungsoptimierung bereits 2010 nachgewiesen. Durch eine auf Bounding-boxen basierte Vorgehensweise bei der Durchdringungsprüfung konnte so in der Baugruppenumgebung von *DS SolidWorks* eine automatisierte Packungsoptimierung implementiert werden. Details dazu sind in [MaKö10] und [MaKö11] veröffentlicht. In Abb. 6-53 ist die Optimierung für eine „kreisförmige“ Bauplattform dargestellt, durch diese Vorgehensweise erfolgt die Anordnung der Bauteile in dem Teil der Bauplattform, wo die beste Genauigkeit erwartet werden kann. Das Bild zeigt die Optimierung von STL-Bauteilen, was dem Stand der Technik von 2010 entspricht. Die Vorgehensweise funktioniert identisch mit nicht-facettierter Geometrie in *SolidWorks*.

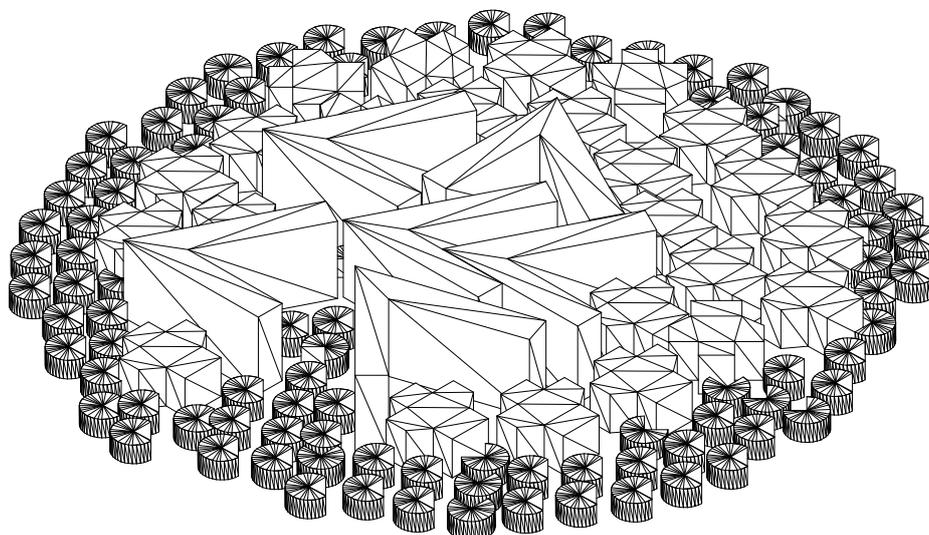


Abb. 6-53: Automatische Packungsoptimierung mit *SolidWorks*

Anwendungsspezifisch kann die Lösung hier durch die vielfältig beschriebenen Lösungen zur Packungsoptimierung aus dem Operations Research ergänzt werden (vgl. 5.1.2).

6.3.2 Generierung von Stützkonstruktionen

Die Generierung von Stützkonstruktionen ist ein komplexes Problem, bei dem viele verschiedene anwendungsspezifische Freiheitsgrade berücksichtigt werden müssen. Prinzipiell sind auch hier Teillösungen durch die CAD-Software abbildbar. So ist es einfach möglich, Flächen mit bestimmten Eigenschaften zu ermitteln. Dies können z. B. alle Flächen mit negativer Z-Komponente des Normalenvektors sein oder Flächen, die eine bestimmte Neigung aufweisen. Da bereits umfassende Lösungen zur anwendungsspezifischen Erzeugung von Stützkonstruktionen verfügbar sind (vgl. 5.2), bietet sich auch an dieser Stelle eine Integration an. Alternativ ist auch eine Kopplung an spezielle Expertensoftware eine Variante. Besonders bei komplexen Stützkonstruk-

tionen kann dies zu einem besseren Ergebnis führen. Sinnvoll ist dann der Austausch der Geometrie über das AMLF-Datenformat. So ist eine bidirektionale Kopplung der verschiedenen Softwarelösungen denkbar.

Je nach Ausführung der Stützkonstruktionen können diese auch als AF-Feature ergänzt werden. Zumindest bei einfacher Stützkonstruktionsgeometrie ist so eine Integration gut umsetzbar. Dazu werden die Flächen ermittelt, die Stützkonstruktionen benötigen. In Folge werden diese in eine bauplattformparallele Kontur projiziert. Diese wird mit einem Muster von einfacher Stützkonstruktionsgeometrie gefüllt. Diese werden wiederum in Baurichtung bis zur stützenden Fläche extrudiert. Diese Vorgehensweise wurde erfolgreich in der CAD-Umgebung evaluiert, Abb. 6-54 zeigt dies exemplarisch.

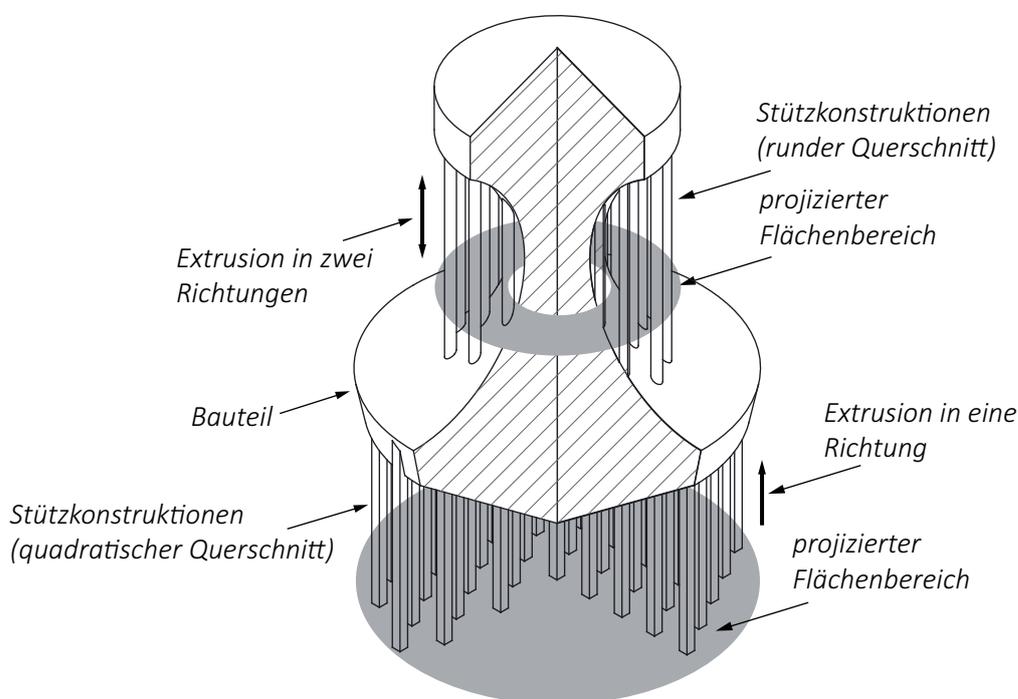


Abb. 6-54: Erzeugung von featurebasierten Stützkonstruktionen

6.3.3 Erzeugung der Fertigungsdaten

Abschließend muss der Export der Fertigungsparameter erfolgen. Das AMLF-Datenformat bietet hier eine Grundlage durch die bereits definierten Konturen und Flächenbereiche. Belichtungspfade müssen daher vorrangig noch für die zu füllenden Flächenbereiche generiert werden. Diese Planung der Belichtungspfade muss anlagenabhängig erfolgen, daher ist es sinnvoll, mit Einstellungsdateien und entsprechenden Prozessoren zu arbeiten. Diese „übersetzen“ die vom Fertigungsplaner definierten Einstellungen in eine maschinenlesbare Form. Dies erfolgt abhängig von der verwendeten Anlage. Auch an dieser Stelle ist es ggf. erforderlich, eine Kopplung von entsprechender, anlagenspezifischer Software und der CAM-Umgebung umzusetzen, statt eine

vollständige Integration anzustreben. Da diese Prozessschritte nicht im Fokus dieser Arbeit liegen, erfolgt keine weitere Detaillierung.

6.4 Übertragbarkeit des Ansatzes bei abweichenden Software-Konstellationen

Die zuvor beschriebene Lösung bezieht sich insbesondere auf *PTC Creo* und *Autodesk Inventor*. Diese beiden Systeme sind aufgrund der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit und API-Schnittstellen so ausgewählt worden, dass von einer Übertragbarkeit der Lösung auf andere CAD-Systeme ausgegangen werden kann. Im Abschnitt 6.3.1 ist für weitere Systeme beispielhaft dargestellt, wie auch eine *DS SolidWorks*-Integration umgesetzt werden kann. Die in Abb. 6-46 gezeigte direkte Schichtdatengenerierung ist versuchsweise auch mit *Siemens NX* durch Nutzung von *Knowledge Fusion* umgesetzt worden (vgl. [MaKö13a]).

Generell muss das Software-System, das für eine Implementierung genutzt werden soll, eine Programmierschnittstelle aufweisen. Mit einer solchen API muss der Entwickler dann in der Lage sein, die beschriebenen Menüs und Algorithmen zu implementieren. Dazu ist es notwendig, dass auch auf beschriebene Funktionen, wie die Ermittlung der Bauteilgröße oder die Nutzung von UDFs, über die API zugegriffen werden kann. Üblicherweise bieten die aktuell verfügbaren 3D-CAD-Systeme diese Schnittstelle zur Programmierung von benutzerdefinierten Funktionen an. Gängige genutzte Programmiersprachen sind beispielsweise *Visual Basic*, *Java*, *C#*, oder *C++*. Aktuelle Entwicklungen sind für den Benutzer schnell erlernbare und vergleichsweise einfache Schnittstellen, z. B. für *Siemens NX* die *Simple NX Application Programming (SNAP)*⁴⁰-Schnittstelle. Hier können auch ohne tiefgehende Programmierkenntnisse Abläufe zur Automatisierung programmiert werden.

Da auch im Bereich der CAD-Systeme die Automatisierung mittlerweile eine wesentliche Systemanforderung ist, kann zukünftig von einer Verbesserung und Erweiterung der vorhandenen Schnittstellen ausgegangen werden.

⁴⁰ WWW: http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/for-design/productivity-tools/customization-programming.shtml

7 Zusammenfassung und Ausblick

Derzeit etablieren sich additive Fertigungsverfahren als Alternative zu den bekannten und erprobten konventionellen Fertigungsverfahren. Unterstützt von dem öffentlichen Interesse an 3D-Druckverfahren steigt das Bewusstsein der Produktentwickler für diese spezielle Art der werkzeuglosen Bauteilfertigung. Auch wenn es sich bei globaler Betrachtung des Markts noch um eine Nischentechnologie handelt, sind die Lösungen bereits so ausgereift, dass Bauteile mit Serienteileigenschaften gefertigt werden können. Traditionell ist die Branche durch Fertigungstechnologen geprägt. Basierend auf dieser eher heterogenen Struktur kann viel Wissen auf der Seite der Fertigungstechnologen festgestellt werden, auf der Seite der Konstrukteure sind jedoch Wissenslücken vorhanden. Somit ist es oft der Fall, dass Bauteile mit dem Fokus auf ein bestimmtes konventionelles Fertigungsverfahren gestaltet werden, dann aber eine additive Fertigung erfolgen soll. Mag diese Vorgehensweise für Prototypen gerechtfertigt sein, ist eine für die additive Einzel- oder Serienfertigung optimierte Gestaltung auf diese Weise nicht erfolgt. Diese Struktur hat sich auch auf die Softwarelandschaft aufgeprägt. So sind auf der einen Seite die 3D-CAD-Systeme vorhanden, mit deren Hilfe die Bauteile modelliert werden. Üblicherweise erfolgt ein Export von wenig aussagekräftigen STL-Daten, die in sehr leistungsfähiger prozessvorbereitender Software vom Fertigungstechnologen angepasst und für die Fertigung vorbereitet werden. Die fertigungsgerechte Ausgestaltung findet somit nicht mehr zwingend auf der Konstruktionsseite statt, sondern wird vom Fertigungstechnologen vollzogen. Dies führt zu unnötigen Iterationen und beeinflusst so die Gesamtkosten und die Bauteilqualität. An dieser Stelle kann demnach ein erhebliches Optimierungspotenzial der Prozesskette identifiziert werden.

Ziel dieser Arbeit war es, ein Konzept für eine anforderungsgerechte CAD-CAM-Umgebung für die additive Fertigung zu entwickeln und deren Umsetzbarkeit nachzuweisen. Dazu wurden zunächst systematisch die Anforderungen an die CAD-CAM-Prozesskette erfasst. Ergänzt worden ist dies um die Erfassung von anwendungsbezogenen Anforderungen an einem Demonstrator. Hier wurde die gekühlte Leitschaufel einer Gasturbine gewählt, da die Gestaltung der Kühlluftführung und Bohrungen in Kombination mit der Freiformgeometrie als besonders geeignet zur Detaillierung und Beschreibung der Problemstellung bewertet worden ist.

Basierend auf den so ermittelten Anforderungen ist die umfassende Recherche und Analyse bestehender Teillösungen für die ermittelten Anforderungen erfolgt. Durch diese Analyse der digitalen Prozesskette konnten die wissenschaftlich dokumentierten Lösungsansätze für die Bearbeitung von geometrisch oder prozesstechnisch relevanten Anwendungsfällen identifiziert und bewertet werden. Auch die erhältliche Experten-

software wurde untersucht. Hier konnte festgestellt werden, dass für ausgewählte Teilprobleme stabile Lösungsalgorithmen zur Implementierung vorhanden sind. Diesbezüglich ist jedoch auch festzuhalten, dass die beschriebenen oder erhältlichen Lösungen größtenteils den de facto Industriestandard STL zum Austausch der Daten und als Basis für die geometrischen Operationen nutzen.

Als Lösungsansatz wurde ein dreistufiges Vorgehensmodell zur Optimierung der bestehenden AF-CAD-CAM-Prozesse entwickelt. In der ersten Stufe wurden die vorhandenen Systeme so erweitert und verknüpft, dass das wesentliche Fertigungswissen in der CAD-Umgebung verfügbar ist. Erweitert um eine Anbindung externer Expertensoftware zur Analyse AF-spezifischer Probleme, z. B. der Stützkonstruktionsproblematik, wurde so die AF-gerechte Bauteilgestaltung optimiert. Um die Umsetzbarkeit einer solchen Integration nachzuweisen, ist eine vollständige programmiertechnische Implementierung dieser Stufe in den CAD-Systemen *PTC Creo* und *Autodesk Inventor* als Erweiterung *Additive Manufacturing CAD-Tools (AMC)* erfolgt. Die zweite Entwicklungsstufe beschreibt einen Ansatz zur Umsetzung von Bauteilen mit heterogenen Materialeigenschaften und der daraus resultierenden Notwendigkeit der direkten Schichtdatengenerierung in der CAD-Umgebung. Hier wurde ein alternatives Schichtdatenformat *Additive Manufacturing Layer File Format (AMLF)* entwickelt das dazu in der Lage ist, die erforderlichen Schichtinformationen und Metadaten zu übertragen. Als Alternative zu den vorhandenen Datenformaten konnte so ein Weg für den umfassenden Datenaustausch auf Schichtebene beschrieben werden. Ebenfalls wurde erläutert, wie eine adaptive Schichtzerlegung in der CAD-Umgebung erfolgen kann. In diesem Zusammenhang wurde das Konzept der bereichsweise adaptiven Schichtzerlegung entwickelt, das von vielen verschiedenen Schichtdicken absieht und wenige, fertigungstechnisch sinnvolle, Schichtdicken über entsprechende Bereiche in dem Bauteil umsetzt. Abschließend ist mit der dritten Stufe ein Konzept beschrieben worden, das aufzeigt, wie alle bekannten Teillösungen zu einer AF-CAD-CAM-Umgebung kombiniert werden können.

Das Ziel der Arbeit, eine AF-spezifische CAD-CAM-Lösung zu beschreiben, wurde somit erreicht. Die Arbeit hat gezeigt, dass für die zugrundeliegenden Teilprobleme bereits Lösungen identifiziert werden können, wodurch für eine vollständige Integration im Wesentlichen die umfassende programmiertechnische Umsetzung in einer CAD-CAM-Lösung aussteht. Als weiteres Ergebnis wurde das Schichtdatenformat AMLF beschrieben, mit dessen Hilfe Schicht- und Metadaten ausgetauscht werden können. Die Arbeit konnte auch zeigen, dass durch Anwendung der Systems Engineering Methoden und der Systemmodellierungssprache SysML die Systementwicklung nachhaltig unterstützt und optimiert werden kann. Als wesentlicher Vorteil von SysML stellte sich die Möglichkeit heraus, Soft- und Hardwarekomponenten eines

Systems im gegenseitigen Zusammenhang zu beschreiben und die Anforderungen an das System möglichst vollständig zu erfassen.

Als Ausblick kann somit festgehalten werden, dass die umfassende Ausgestaltung einer AF-CAD-CAM-Lösung möglich ist. Ansätze dazu sind bereits durch die gestiegene Zusammenarbeit von CAD-Systemherstellern und den Branchengrößen der AF zu erkennen. Mit zunehmender Bedeutung der AF-Technologie ist somit eine Angleichung an die CAD-CAM-Umgebungen zu erwarten, die für die konventionelle Fertigung bereits verfügbar sind. Wenn dies erfolgt ist, kann durch effizientere Nutzung der additiven Fertigungsverfahren die Nutzung der konventionellen Fertigung in bestimmten Bereichen substituiert werden. Der in der Arbeit beschriebene Demonstrator ist nur ein Beispiel für die Möglichkeiten, die sich aus der umfassenden Nutzung dieser Fertigungstechnologie bei der Produktgestaltung ergeben.

Auf der Forschungsseite zeigen sich die Material- und Strukturentwicklung als die großen Herausforderungen. Auch wenn diese Arbeit ansatzweise zeigen konnte, wie heterogene Bauteileigenschaften abgebildet werden können, bleiben viele fertigungstechnische Fragen diesbezüglich noch unbeantwortet. Die Tatsache, dass der Fertigungsprozess gleichzeitig das Bauteil in seiner Gestalt und das Material in seinen Eigenschaften abbildet, bietet für die Zukunft noch ein derzeit schwer erfassbares Entwicklungspotenzial. Auch wesentliche Fragen der Qualitätssicherung müssen erst noch beantwortet werden, um ausreichende Sicherheiten nachweisen zu können. Hier kann die beschriebene Methode der Wissensintegration für die Unterstützung von zukünftigen Entwicklungen genutzt werden. Können diese noch offenen Fragen beantwortet werden, erfolgt zukünftig die Etablierung der additiven Fertigungsverfahren als konventionelle Technologie.

Literaturverzeichnis

- [3D14] 3D Printing Systems: *Kevvox K-Studio Software*. <http://3dprintingsystems.com/products/3d-printers/kevvox-3d-printers-overview/kevvox-k-studio-software/>, zuletzt aufgerufen am 12.02.2015.
- [AcDe06] Acquaviva, P.; Demers, D.; Manning, R.: *Gasturbinenschaufel mit serpentinenförmigen Kühlkanälen*. DE69923746 T2, 2006.
- [Ad14] Adobe: *Photoshop-Hilfe. Drucken von 3D-Objekten*. <https://helpx.adobe.com/de/photoshop/using/print-3d-objects.html?set=photoshop--whats-new--2014-01>, zuletzt aufgerufen am 03.03.2015.
- [Ad15] Adam, Guido A. O.: *Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling*. Shaker, Herzogenrath, 2015.
- [AgFl02] Agarwal, P. K.; Flato, E.; Halperin, D.: *Polygon Decomposition for Efficient Construction of Minkowski Sums*. Computational Geometry, 2002, 21; S. 39–61.
- [Al12] Alt, O.: *Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. In der Praxis*. Hanser, Carl, München, 2012.
- [Al15] Almacam: *CAM-Software für Schachteln und Schneidoptimierung*. <http://de.almacam.com/Produkte/CAM-Software-fuer-Schachteln-und-Schneidoptimierung>, zuletzt aufgerufen am 06.02.2015.
- [AlAl98] Alexander, P.; Allen, S.; Dutta, D.: *Part Orientation and Build Cost Determination in Layered Manufacturing*. Computer-Aided Design, 1998, 30; S. 343–356. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(97\)00083-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00083-3).
- [AlDu94] Allen, S.; Dutta, D.: *On the Computation of Part Orientation Using Support Structures in Layered Manufacturing*. Solid Freeform Fabrication Symposium 1994, 1994; S. 259–269.
- [AlDu95] Allen, S.; Dutta, D.: *Determination and Evaluation of Support Structures in Layered Manufacturing*. Journal of Design and Manufacturing, 1995, 5; S. 153–162.
- [AlDu97] Allen, S.; Dutta, D.: *Wall Thickness Control in Layered Manufacturing*. Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on Computational Geometry, 1997.
- [AlSa80] Albano, A.; Sapuppo, G.: *Optimal Allocation of Two-Dimensional Irregular Shapes Using Heuristic Search Methods*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1980, 10; S. 242–248. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1980.4308483>.
- [Au15] Autodesk: *Spark. The Open and Free 3D Printing Platform*. <http://spark.autodesk.com/>, zuletzt aufgerufen am 04.03.2015.
- [BeJo03] Beeck, A.; Johnson, B.; Weigand, B.; Wu, P.-S.: *Kühlsystem für den Vorderkantenbereich einer hohlen Gasturbinenschaufel*. DE59709195 D1, 2003.

- [BeOl08] Bennell, J. A.; Oliveira, J. F.: *The Geometry of Nesting Problems: A Tutorial*. European Journal of Operational Research, 2008, 184; S. 397–415. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.038>.
- [Bi02] Bianconi, F.: *Bridging the Gap Between CAD and CAE Using STL Files*. International Journal of CAD/CAM, 2002, 1; S. 55–67.
- [BiSh04] Biswas, A.; Shapiro, V.; Tsukanov, I.: *Heterogeneous Material Modeling with Distance Fields*. Computer Aided Geometric Design, 2004, 21; S. 215–242. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cagd.2003.08.002>.
- [BłHa93] Błażewicz, J.; Hawryluk, P.; Walkowiak, R.: *Using a Tabu Search Approach For Solving the Two-Dimensional Irregular Cutting Problem*. Annals of Operations Research, 1993, 41; S. 313–325. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02022998>.
- [Br13] Breuninger, J.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für selektives Lasersintern*. Springer, Berlin [u.a.], 2013.
- [BuHe06] Burke, E.; Hellier, R.; Kendall, G.; Whitwell, G.: *A New Bottom-Left-Fill Heuristic Algorithm for the Two-Dimensional Irregular Packing Problem*. Operations Research, 2006, 54; S. 587–601.
- [BuHe07] Burke, E. K.; Hellier, R.; Kendall, G.; Whitwell, G.: *Complete and Robust No-Fit Polygon Generation for the Irregular Stock Cutting Problem*. European Journal of Operational Research, 2007, 179; S. 27–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.03.011>.
- [ByLe06] Byun, H. S.; Lee, K. H.: *Determination of Optimal Build Direction in Rapid Prototyping with Variable Slicing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28; S. 307–313. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-004-2355-5>.
- [CaGi13] Canellidis, V.; Giannatsis, J.; Dedoussis, V.: *Efficient Parts Nesting Schemes for Improving Stereolithography Utilization*. Computer-Aided Design, 2013, 45; S. 875–886. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2012.12.002>.
- [CaRi03] Carravilla, M. A.; Ribeiro, C.; Oliveira, J. F.: *Solving Nesting Problems With Non-Convex Polygons by Constraint Logic Programming*. International Transactions in Operational Research, 2003, 10; S. 651–663.
- [CaWi11] Campbell, T.; Williams, C.; Ivanova, O.; Garrett, B.: *Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Strategic Foresight Report, 2011.
- [ChFe04] Chen, K.-Z.; Feng, X.-A.: *CAD Modeling for the Components Made of Multi Heterogeneous Materials and Smart Materials*. Computer-Aided Design, 2004, 36; S. 51–63. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(03\)00077-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00077-0).
- [ChFu03] Chen, P.; Fu, Z.; Lim, A.; Rodrigues, B.: *Two Dimensional Packing for Irregular Shaped Objects*. proceedings of the thirty-sixth Hawaii International Conference on System Sciences, 2003.

- [ChFu95] Cheng, W.; Fuh, J.; Nee, A.; Wong, Y. S.; Loh, H. T.; Miyazawa, T.: *Multi-Objective Optimization of Part-Building Orientation in Stereolithography*. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1; S. 12–23. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549510104429>.
- [CoUn00] Cormier, D.; Unnanon, K.; Sanii, E.: *Specifying Non-Uniform Cusp Heights as a Potential Aid for Adaptive Slicing*. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6; S. 204–212. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540010337074>.
- [Cu89] Cunninghamgreen, R.: *Geometry, Shoemaking and the Milk Tray Problem*. New Scientist, 1989, 123; S. 50–53.
- [Da10] Danjou, S.: *Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie*. Cuvillier, Göttingen, 2010.
- [DaHa02] Daenzer, W. F.; Haberfellner, R.: *Systems Engineering. Methodik und Praxis*. Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 2002.
- [DaKö08] Danjou, S.; Köhler, P.: *Bridging the Gap between CAD and Rapid Technologies. Exigency of Standardized Data Exchange*. AEPR, Paris, 2008.
- [De14] Delligatti, L.: *SysML distilled. A Brief Guide to the Systems Modeling Language*. Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2014.
- [Di13] Digital Engineering Magazin: *Rapid Manufacturing: Management eines additiven Werkes*. <http://www.digital-engineering-magazin.de/rapid-manufacturing-management-eines-additiven-werkes>, zuletzt aufgerufen am 13.02.2015.
- [DIN8580] DIN: *Fertigungsverfahren-Begriffe, Einteilung*. DIN8580:2003-09, 2003.
- [DoMä94] Dolenc, A.; Mäkelä, I.: *Slicing Procedures for Layered Manufacturing Techniques*. Computer-Aided Design, 1994, 26; S. 119–126. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90032-9](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(94)90032-9).
- [Du08] Dungs, S.: *Wissensbasierte Geometriemodelle zur Strukturanalyse*. Shaker, Aachen, 2008.
- [DuHe14] Dumas, J.; Hergel, J.; Lefebvre, S.: *Bridging the Gap: Automated Steady Scaffoldings for 3D Printing*. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33; S. 1–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2601097.2601153>.
- [Dy90] Dyckhoff, H.: *A Typology of Cutting and Packing Problems*. European Journal of Operational Research, 1990, 44; S. 145–159. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-K](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-K).
- [Eh13] Ehrenberg, N.: *Ersatzteile aus der Laserkammer*. Pictures of the Future, 2013, 2013; S. 31–33.
- [EiLa13] Eisenhut, M.; Langefeld, B.: *Additive Manufacturing. A Game Changer for the Manufacturing Industry?* http://www.rolandberger.com/media/publications/2013-11-29-rbsc-pub-Additive_manufacturing.html, zuletzt aufgerufen am 09.04.2014.

- [ElGe05] Elishakoff, I.; Gentilini, C.; Viola, E.: *Three-Dimensional Analysis of an All-Round Clamped Plate Made of Functionally Graded Materials*. Acta Mechanica, 2005, 180; S. 21–36. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00707-005-0270-y>.
- [EOS15] EOS: *EOS - Dental*. <http://www.eos.info/dental/dental.html>, zuletzt aufgerufen am 06.02.2015.
- [ErAk06] Eraslan, A. N.; Akis, T.: *On the Plane Strain and Plane Stress Solutions of Functionally Graded Rotating Solid Shaft and Solid Disk Problems*. Acta Mechanica, 2006, 181; S. 43–63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00707-005-0276-5>.
- [FaSo14] Farzadi, A.; Solati-Hashjin, M.; Asadi-Eydivand, M.; Abu Osman, Noor Azuan: *Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Potted Prous Samples for Bone Tissue Engineering*. PloS one, 2014, 9; S. e108252. DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0108252>.
- [FeAl98] Ferreira, J. C.; Alves, J. C.; Albuquerque, C.; Oliveira, J. F.; Ferreira, J. S.; Matos, J. S.: *A Flexible Custom Computing Machine for Nesting Problems*. Proceedings of XIII DCIS, Madrid, Spain, 1998; S. 348–354.
- [Fr15] Fraunhofer SCAI: *PackAssistant: Optimierte 3D-Verpackungsplanung*. <http://www.packassistant.de/optimierte-3d-verpackungsplanung.html>, zuletzt aufgerufen am 06.02.2015.
- [FuSu04] Fukuno, H.; Suenga, K.; Tomita, Y.: *Cooled Stationary Blade of Gas Turbine*. EP0894946 B1, 2004.
- [Ga13] Gartner Inc.: *Gartner's 2013 Hype Cycle for Emerging Technologies*. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515>, zuletzt aufgerufen am 23.07.2014.
- [Ge13] Gebhardt, A.: *Generative Fertigungsverfahren. Additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. Hanser, München, 2013.
- [GeFa14] Gebhardt, A.; Fateri, M.: *3D Drucken und die Anwendungen*. RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, 2014.
- [Gh91] Ghosh, P. K.: *An Algebra of Polygons Through the Notion of Negative Shapes*. CVGIP: Image Understanding, 1991, 54; S. 119–144.
- [GiRo10] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies*. Springer US, Boston, MA, 2010.
- [GoPa08] Gogate, A. S.; Pande, S. S.: *Intelligent Layout Planning for Rapid Prototyping*. International Journal of Production Research, 2008, 46; S. 5607–5631. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540701277002>.
- [Hä98] Häuser, S.: *Generierung, Darstellung und Interaktion mit Voxel*. Diplomarbeit, Stuttgart, 1998.
- [HaAs13] Hayasi, M. T.; Asiabanpour, B.: *A New Adaptive Slicing Approach for the Fully Dense Freeform Fabrication (FDF) Process*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24; S. 683–694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-011-0615-4>.

- [HaMa04] Hague, R.; Mansour, S.; Saleh, N.: *Material and Design Considerations for Rapid Manufacturing*. International Journal of Production Research, 2004, 42; S. 4691–4708. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207840410001733940>.
- [HaSh05] Halavati, R.; Shouraki, S. B.; Noroozian, M.; Zadeh, S. H.: *Optimizing Allocation of Two Dimensional Irregular Shapes using an Agent Based Approach*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2005, 11.
- [HiLi09] Hiller, J.; Lipson, H.: *STL 2.0. A Proposal for A Universal Multi-Material Additive Manufacturing File Format*, 2009.
- [Ho07] Hood, C.: *Requirements Management. Interface Between Requirements Development and All Other Engineering Processes*. Springer, Berlin, London, 2007.
- [HoGe13] Hongmei, Z.; Ge, Q.: *Heterogeneous Turbine Blade Modeling Based on Multi-Color Distance Field*. Advanced Materials Research, 2013, 753-755; S. 902–907. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.902>.
- [HoJa97] Hope, R. L.; Jacobs, P. A.; Roth, R. N.: *Rapid Prototyping With Sloping Surfaces*. Rapid Prototyping Journal, 1997, 3; S. 12–19. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549710169246>.
- [HoPe08] Holt, J.; Perry, S.: *SysML for Systems Engineering*. Institution of Engineering and Technology, Stevenage, 2008.
- [HoRo97] Hope, R. L.; Roth, R. N.; Jacobs, P. A.: *Adaptive Slicing With Sloping Layer Surfaces*. Rapid Prototyping Journal, 1997, 3; S. 89–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549710185662>.
- [HoWi13] Hoeren, K.; Witt, G.: *Design-Opportunities and Limitations on Additive Manufacturing Determined by a Suitable Test-Specimen*. Digital Product and Process Development Systems, Proceedings of the IFIP TC 5 International Conference, NEW PROLAMAT 2013, Dresden, 2013; S. 138–152. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-41329-2_15.
- [HoZh09] Hongmei, Z.; Zhigang, L.; Bingheng, L.: *Heterogeneous Object Modeling Based on Multi-Color Distance Field*. Materials & Design, 2009, 30; S. 939–946. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.002>.
- [HuCh01] Hur, S.-M.; Choi, K.-H.; Lee, S.-H.; Chang, P.-K.: *Determination of Fabricating Orientation and Packing in SLS Process*. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 112; S. 236–243.
- [HuKö14] Humpa, M.; Köhler, P.: *Effizienzsteigerung des Produktentwicklungsprozesses durch fertigungsgerechte CAD-Methoden*. (Stelzer, R. et al. Hrsg.): 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014. Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess, Bayreuth, 2014; S. S. 263-273.

- [HuNo14] Huang, Q.; Nouri, H.; Xu, K.; Chen, Y.; Sosina, S.; Dasgupta, T.: *Predictive Modeling of Geometric Deviations of 3D Printed Products - A Unified Modeling Approach for Cylindrical and Polygon Shapes*. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2014.
- [HuYe11] Huang, W.; Ye, T.; Chen, D.: *Bottom-Left Placement Theorem for Rectangle Packing*. <http://arxiv.org/pdf/1107.4463v1.pdf>, 2011.
- [IkBi97] Ikonen, I.; Biles, W. E.; Kumar, A.; Ragade, R. K.; Wissel, J. C.: *A Genetic Algorithm for Packing Three-Dimensional Non-Convex Objects Having Cavities and Holes*, 1997.
- [IJJa07] Ilinkin, I.; Janardan, R.; Smid, M.; Johnson, E.; Castillo, P.; Schwerdt, J.: *Heuristics for Estimating Contact Area of Supports in Layered Manufacturing*. Journal of Experimental Algorithmics (JEA), 2007, 11; S. 1–6.
- [ISO10303] DIN: *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration-Produktendarstellung und -austausch*. DIN EN ISO 10303:2003-07, 2003.
- [ISO14306] ISO: *Industrial Automation Systems and Integration - JT File Format Specification for 3D Visualization*. ISO 14306:2012, 2012.
- [ISO25010] ISO/IEC: *Systems and Software Engineering -Systems and Software Quality Requirements and Evaluation(SQuaRE) - System and software quality models*. ISO/IEC 25010:2011, 2011.
- [ISO52915] ISO/ASTM: *Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.1*. ISO/ASTM 52915-13, 2013.
- [ISO9126] ISO/IEC: *Information Technology. Software Product Quality. Quality model*. BS ISO/IEC 9126-1:2001, 2001.
- [Ja96] Jakobs, S.: *On Genetic Algorithms for the Packing of Polygons*. European Journal of Operational Research, 1996, 88; S. 165–181. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00166-9](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(94)00166-9).
- [JaHa95] Jamieson, R.; Hacker, H.: *Direct Slicing of CAD Models for Rapid Prototyping*. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1; S. 4–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549510086826>.
- [JaKa99] Jacob, G. G.; Kai, C. C.; Mei, T.: *Development of a New Rapid Prototyping Interface*. Computers in Industry, 1999, 39; S. 61–70. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615\(98\)00124-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(98)00124-9).
- [JaLi99] Jackson, T. R.; Liu, H.; Patrikalakis, N. M.; Sachs, E. M.; Cima, M. J.: *Modeling and Designing Functionally Graded Material Components for Fabrication with Local Composition Control*. Materials & Design, 1999, 20; S. 63–75. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00011-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00011-4).
- [JeWo00] 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*. Chinese Society Of Mechanical Engineers Journal, 2000, 21; S. 351–358.

- [Jy10] Jylänki, J.: *A Thousand Ways to Pack the Bin - A Practical Approach to Two-Dimensional Rectangle Bin Packing*. <http://clb.demon.fi/files/RectangleBinPack.pdf>, 2010.
- [Ka07] Kapurch, S. J.: *NASA Systems Engineering Handbook*, 2007.
- [KaJa97a] Kai, C. C.; Jacob, G. G. K.; Mei, T.: *Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. Part 1: A Study of Existing Interfaces*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997a, 13; S. 566–570. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01176300>.
- [KaJa97b] Kai, C. C.; Jacob, G. G. K.; Mei, T.: *Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. Part 2: LMI - An Improved Interface*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997b, 13; S. 571–576. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01176301>.
- [Ki08] Kissel, H.: *Filmkühlung bei komplexen Innenströmungen*, 2008.
- [KiJa91] Kirschman, C. F.; Jara-Almontem C.C.; Bagchi, A.; Dooley, R. L.; Ogale, A. A.: *Computer Aided Design of Support Structures for Stereolithographic Components*, Clemson, USA, 1991.
- [Kl01] Klingels, H.: *Kühlluftsystem*. WO2001065095 A1, 2001.
- [Kl15] Klemme, U.: *Methoden zum wissensbasierten Aufbau simulationsorientierter Produktmodelle*. Cuvillier, Göttingen, 2015.
- [Kö02] Köhler, P.: *Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau*. Vogel, Würzburg, 2002.
- [Kö14] Köhler, P.: *Rechnerunterstützter Bauteilentwurf. Rechnerinterne Datenmodelle*. Vorlesungsskript, Duisburg, 2014.
- [Ko81] Konopasek, M.: *Mathematical Treatments of Some Apparel Marking and Cutting Problems*. U.S. Department of Commerce Report 99-26-90857-10, 1981.
- [KoSz13] Kovács, A.; Szabados, K.: *Test Software Quality Issues and Connections to International Standards*. Acta Univ. Sapientiae, 2013, 5; S. 77–102.
- [KoTa05] Kou, X. Y.; Tan, S. T.: *A Hierarchical Representation for Heterogeneous Object Modeling*. Computer-Aided Design, 2005, 37; S. 307–319. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2004.03.006>.
- [KöWi14] Köhler, P.; Witt, G.; Weckend, F.; Martha, A.; Hoeren, K.; Lothar, P.: *Wissensbasiertes Unterstützungssystem für Rapid Manufacturing gerechte 3D-CAD-CAM Prozesse*. Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben 424 ZBG, 2014.
- [KöWi15] Köhler, P.; Witt, G.; Martha, A.; Reinhardt, T.: *Multiziel-Optimierung des Pre-Prozesses zur Qualitätssicherung additiv gefertigter Bauteile*. DFG-Abschlussbericht für KO 1620/11-1 und WI 2118/4-1, Duisburg, 2015.
- [Kr14] Krassenstein, E.: *3DPrintTech: Free Software Released to 3D Print Objects Larger Than Printer's Build Volume*. 3dprint.com, 2014.
- [KuDu96] Kulkarni, P.; Dutta, D.: *An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing*. Computer-Aided Design, 1996, 28; S. 683–697. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(95\)00083-6](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(95)00083-6).

- [KuDu98] Kumar, V.; Dutta, D.: *An Approach to Modeling & Representation of Heterogeneous Objects*. Journal of Mechanical Design, 1998, 120; S. 659. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2829329>.
- [KuMa00] Kulkarni, P.; Marsan, A.; Dutta, D.: *A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing*. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6; S. 18–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540010309859>.
- [La00] Lander, J.: *Crashing into the New Year: Collision Detection*. http://www.gamasutra.com/view/feature/131836/crashing_into_the_new_year_.php, zuletzt aufgerufen am 05.02.2015.
- [La13] LaMonica, M.: *3-D Printing Will Soon Become a Routine Manufacturing Tool. 10 Breakthrough Technologies 2013*. <http://www.technologyreview.com/featuredstory/513716/additive-manufacturing/>, zuletzt aufgerufen am 02.04.2014.
- [Le10] Lechner, C.: *Stationäre Gasturbinen*. Springer, Heidelberg, 2010.
- [LeCh00] Lee, K. H.; Choi, K.: *Generating Optimal Slice Data for Layered Manufacturing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16; S. 277–284. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s001700050157>.
- [Li00] Liu, H.: *Algorithms for Design and Interrogation of Functionally Graded Material Solids*. Master Thesis, Cambridge, 2000.
- [Li13] Lipson, H.: *AMF or AML: A Format or a Language?* https://groups.google.com/d/msg/stl2/Z8u47HqcMIE/XE__p0AjxAAJ, zuletzt aufgerufen am 15.04.2014.
- [LiHe06] Liu, H.-y.; He, Y.-j.: *Algorithm For 2D Irregular-Shaped Nesting Problem Based on the NFP Algorithm and Lowest-Gravity-Center Principle*. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2006, 7; S. 570–576. DOI: <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.2006.A0570>.
- [LiHi04] Lipson, H.; Hiller, J.: *Draft Additive Manufacturing File Format*. <http://amf.wikispaces.com/>, zuletzt aufgerufen am 25.09.2014.
- [LiMa04] Liu, H.; Maekawa, T.; Patrikalakis, N. M.; Sachs, E. M.; Cho, W.: *Methods for Feature-Based Design of Heterogeneous Solids*. Computer-Aided Design, 2004, 36; S. 1141–1159.
- [Lt13] Miromedia Ltd.: *Objet Product Prototype Software / HK 3D Printing*. <http://www.hk3dprinting.co.uk/product-prototype.html>, zuletzt aufgerufen am 12.02.2015.
- [Lu09] Lupa, N.: *Einsatz wissensbasierter Features für die automatische Konfiguration von Produktkomponenten*. Cuvillier, Göttingen, 2009.
- [LuCh01] Luo, R. C.; Chang, Y.: *The Development of A New Adaptive Slicing Algorithm for Layered Manufacturing System*. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2001.
- [Ma15a] Materialise: *Magics SG+ Module*. <http://software.materialise.com/magics-sg-plus-module>, zuletzt aufgerufen am 12.02.2015.
- [Ma15b] Materialise: *Magics AutoFab Suite*. <http://www.materialise.de/magics-autofab-suite>, zuletzt aufgerufen am 12.02.2015.

- [Ma15c] Materialise: *3-matic. Lightweight Structures Module*. <http://software.materialise.com/3-matic-lightweight-structures-module>, zuletzt aufgerufen am 12.03.2015.
- [Ma15d] Materialise: *Magics Tree Support Module*. <http://software.materialise.com/magics-tree-support-module>, zuletzt aufgerufen am 13.02.2015.
- [Ma15e] Materialise: *Magics SG Module*. <http://software.materialise.com/magics-sg-module>, zuletzt aufgerufen am 13.02.2015.
- [Ma15f] Materialise: *Magics Sintermodule*. <http://software.materialise.com/magics-sintermodule>, zuletzt aufgerufen am 05.02.2015.
- [Ma84] Mahadevan, A.: *Optimization in Computer-Aided Pattern Packing*, 1984.
- [MaBu04] Ma, W.; But, W.-C.; He, P.: *NURBS-Based Adaptive Slicing for Efficient Rapid Prototyping*. *Computer-Aided Design*, 2004, 36; S. 1309–1325. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2004.02.001>.
- [MaHe99] Ma, W.; He, P.: *An Adaptive Slicing and Selective Hatching Strategy for Layered Manufacturing*. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 89-90; S. 191–197. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00043-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00043-6).
- [MaJa99] Majhi, J.; Janardan, R.; Schwerdt, J.; Smid, M.; Gupta, P.: *Minimizing Support Structures and Trapped Area in Two-Dimensional Layered Manufacturing*. *Computational Geometry*, 1999, 12; S. 241–267. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-7721\(99\)00003-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-7721(99)00003-6).
- [MaKö10] Martha, A.; Köhler, P.: *Ansatz zur multiziel-optimierten Bauraumnutzung für Anwendungen der RP-Technologie*. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 2010, 13; S. 151–160.
- [MaKö11] Martha, A.; Köhler, P.: *Ansätze zur Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit bei generativen Verfahren durch Optimierung des Pre-Processes*. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, 2011, 8.
- [MaKö13a] Martha, A.; Köhler, P.: *Approaches for the Layer Data Generation for Special Additive Manufacturing Applications*. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2013a, 3; S. 76–83.
- [MaKö13b] Martha, A.; Köhler, P.: *Definierte Erzeugung von Schichtdaten für besondere Anwendungen. Slice-data generation for special applications*. Rapid.Tech - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie, 2013b.
- [MaKu98] Marsan, A. L.; Kumar, V.; Dutta, D.; Pratt, M. J.: *An Assessment of Data Requirements and Data Transfer Formats for Layered Manufacturing*, 1998.
- [MaKu99] Mani, K.; Kulkarni, P.; Dutta, D.: *Region-Based Adaptive Slicing*. *Computer-Aided Design*, 1999, 31; S. 317–333. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(99\)00033-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(99)00033-0).

- [MoVe03] Mohan Pandey, P.; Venkata Reddy, N.; Dhande, S. G.: *Slicing Procedures in Layered Manufacturing: A Review*. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9; S. 274–288. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540310502185>.
- [Ne14] netfabb GmbH: *netfabb Professional 5.2 User Manual*. http://www.netfabb.com/manuals_download.php?nid=&fid=27, zuletzt aufgerufen am 05.02.2015.
- [Ne15] netfabb GmbH: *netfabb Professional-Use Professional 3D Printing Software*. <http://www.netfabb.com/professional.php>, zuletzt aufgerufen am 13.02.2015.
- [Ne15a] netfabb GmbH: *Automatic Packing—Reduce Time and Material in Additive Manufacturing*. <http://www.netfabb.com/packing.php>, zuletzt aufgerufen am 05.02.2015.
- [Ne15b] netfabb GmbH: *netfabb Selective Space Structures (3S)-From Solids to Structures in Seconds*. <http://www.netfabb.com/structures.php>, zuletzt aufgerufen am 12.03.2015.
- [OlFe93] Oliveira, J. F. C.; Ferreira, J. A. S.: *Algorithms for Nesting Problems*. (Fandel, G.; Trockel, W.; Vidal, R. V. V. Hrsg.): Applied Simulated Annealing. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1993; S. 255–273.
- [OMG12] OMG: *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™)*. OMG SysML, 2012.
- [OtKi95] Otto, H. E.; Kimura, F.; Mandorli, F.; Cugini, U.: *Extension of Feature-Based CAD Systems Using TAE Structures to Support Integrated Rapid Prototyping*. Proceedings of the Computers In Engineering Conference and the Engineering Database Symposium, 1995; S. 779–794.
- [PaAn11] Paul, R.; Anand, S.: *Optimal Part Orientation in Rapid Manufacturing Process for Achieving Geometric Tolerances*. Journal of Manufacturing Systems, 2011, 30; S. 214–222. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.07.010>.
- [PaCr01] Park, S.-M.; Crawford, R.H.; Beaman, J.J. Hrsg.: *Volumetric Multi-Texturing for Functionally Gradient Material Representation*. ACM, 2001.
- [PaRe03] Pandey, P. M.; Reddy, N. V.; Dhande, S. G.: *Real Time Adaptive Slicing for Fused Deposition Modelling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43; S. 61–71. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00164-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00164-5).
- [PaSp06] Pabst, H.-F. et al. Hrsg.: *Ray Casting of Trimmed NURBS Surfaces on the GPU*, 2006.
- [PaVe07] Pandey, P. M.; Venkata Reddy, N.; Dhande, S. G.: *Part Deposition Orientation Studies in Layered Manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 185; S. 125–131. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.120>.
- [Ph15] Phenix Systems: *Phenix Dental/ Phenix Systems Additive Manufacturing Using Laser Sintering*. <http://www.phenix-systems.com/en/phenix-dental>, zuletzt aufgerufen am 06.02.2015.

- [PhPa12] Phatak, A. M.; Pande, S. S.: *Optimum Part Orientation in Rapid Prototyping Using Genetic Algorithm*. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31; S. 395–402. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.001>.
- [PiTi97] Piegl, L. A.; Tiller, W.: *The NURBS Book*. Springer, Berlin, New York, 1997.
- [PoKe14] Ponche, R.; Kerbrat, O.; Mognol, P.; Hascoet, J.-Y.: *A Novel Methodology of Design for Additive Manufacturing Applied to Additive Laser Manufacturing Process*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30; S. 389–398. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2013.12.001>.
- [PrSh88] Preparata, F. P.; Shamos, M. I.: *Computational Geometry. An Introduction*. Springer, New York [u.a.], 1988.
- [PTC14] PTC: *3D Printing Industry: Stratasys Joins the Club as PTC Creo's Platinum Partner to Streamline Workflows*. <http://creo.ptc.com/2014/11/28/3d-printing-industry-stratasys-joins-the-club-as-ptc-creos-platinum-partner-to-streamline-workflows/>, zuletzt aufgerufen am 03.03.2015.
- [PTC15] PTC: *PTC Creo Production Machining Extension*. <http://de.ptc.com/product/creo/3d-cad/parametric/extension/production-machining>, zuletzt aufgerufen am 16.03.2015.
- [PTC15a] PTC: *Herausforderungen bei der Produktkonstruktion. Multi-CAD-Daten*. <http://de.ptc.com/topics/multi-cad>, zuletzt aufgerufen am 24.04.2015.
- [RaRa01] Ramesh Babu, A.; Ramesh Babu, N.: *A Generic Approach for Nesting of 2-D Parts in 2-D Sheets Using Genetic and Heuristic Algorithms*. Computer-Aided Design, 2001, 33; S. 879–891. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00112-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00112-3).
- [ReMa13] Reinhardt, T.; Martha, A.; Witt, G.; Köhler, P.: *Preprocess-Optimization for Polypropylene Laser Sintered Parts*. Computer-Aided Design and Applications, 2013, 11; S. 49–61. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2013.834138>.
- [Ro13] Rothman, D.: *The Difference Between Makers and Manufacturers*. <http://www.technologyreview.com/review/508821/the-difference-between-makers-and-manufacturers/>, zuletzt aufgerufen am 02.04.2014.
- [Ru09] Rupp, C.: *Requirements-Engineering und -Management. Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis*. Hanser, München, Wien, 2009.
- [Ru14] Rudarakanjana, N.: *General Electric (GE) Talks 3D-Printing Tech: Q&A On Additive Manufacturing*. International Business Times, 2014.
- [Sa06] Salomon, D.: *Curves and Surfaces for Computer Graphics*. Springer, New York, 2006.
- [SaHo96] Sabourin, E.; Houser, S. A.; Helge Bøhn, J.: *Adaptive Slicing Using Stepwise Uniform Refinement*. Rapid Prototyping Journal, 1996, 2; S. 20–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549610153370>.

- [SaHo97] Sabourin, E.; Houser, S. A.; Helge Bøhn, J.: *Accurate Exterior, Fast Interior Layered Manufacturing*. Rapid Prototyping Journal, 1997, 3; S. 44–52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549710176662>.
- [SaKo05] Samanta, K.; Koc, B.: *Feature-Based Design and Material Blending for Free-Form Heterogeneous Object Modeling*. Computer-Aided Design, 2005, 37; S. 287–305.
- [Sc01] Schwerdt, J.: *Entwurf von Optimierungsalgorithmen für geometrische Probleme im Bereich Rapid-Prototyping und Manufacturing*, 2001.
- [Sc02] Schillen, V.: *Erzeugung hochgenauer Schichtzerlegungen von 3D-Modellen für den Einsatz in Rapid-Prototyping-Anwendungen*. dissertation.de, Berlin, 2002.
- [Sc08] Scheithauer, G.: *Zuschnitt- und Packungsoptimierung. Problemstellungen, Modellierungstechniken, Lösungsmethoden*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [Se10] Sehrt, J. T.: *Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren*. Shaker, Aachen, 2010.
- [SeFa86] Segenreich, S. A.; Faria Braga, Leda Maria P.: *Optimal Nesting of General Plane Figures: A Monte Carlo Heuristical Approach*. Computers & Graphics, 1986, 10; S. 229–237. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493\(86\)90007-5](http://dx.doi.org/10.1016/0097-8493(86)90007-5).
- [SeMa12] Sehrt, J.; Martha, A.; Witt, G.: *Strategy for the Manufacturing of Perfused Parts Using Laser Beam Melting*. Conference & Proceedings of the 13th RAPDASA annual international Conference: Additive Manufacturing in Industry, 2012, 13.
- [SeMa14] Sehrt, J. T.; Martha, A.; Witt, G.: *Direct Slicing Approach For The Production Of Perfused Components By Laser Beam Melting*. The South African Journal of Industrial Engineering, 2014, 25; S. 96. DOI: <http://dx.doi.org/10.7166/25-1-701>.
- [SeOt12] Seifert, E.; Otto, C.; Kochan, D.; Thonig, W.: *Konturnähe Werkzeugtemperierung mit Druckluft*. Kunststoffe, 2012; S. 50–53.
- [Si13] Siemens PLM Software: *JT Open Program Technology*, 2013.
- [Si14] Simplify3D: *Software / Simplify3D*. <http://www.simplify3d.com/software/>, zuletzt aufgerufen am 12.02.2015.
- [SiTa02] Siu, Y. K.; Tan, S. T.: *'Source-Based' Heterogeneous Solid Modeling*. Computer-Aided Design, 2002, 34; S. 41–55. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00046-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00046-X).
- [SrDu95] Sreeram, P. N.; Dutta, D.: *Determination of Optimal Orientation Based on Variable Slicing Thickness in Layered Manufacturing*. Proceedings of the 1995 ASME Winter Annual Conference, 1995.
- [St06] Strohmeier, O.: *Integration von Wissensmodulen in den virtuellen Produktentwicklungsprozess*. Shaker, Aachen, 2006.

- [StHa13] Strano, G.; Hao, L.; Everson, R. M.; Evans, K. E.: *A New Approach to the Design and Optimisation of Support Structures in Additive Manufacturing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66; S. 1247–1254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4403-x>.
- [StLa05] Starly, B.; Lau, A.; Sun, W.; Lau, W.; Bradbury, T.: *Direct Slicing of STEP Based NURBS Models for Layered Manufacturing*. Computer-Aided Design, 2005, 37; S. 387–397. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2004.06.014>.
- [StRi12] Steinhilper, R.; Rieg, F.: *Handbuch Konstruktion*. Hanser, München, 2012.
- [StSc04] Stoyan, Y.; Scheithauer, G.; Gil, N.; T. Romanova, T.: *Φ -Functions for Complex 2D-objects*. Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies, 2004.
- [SuHu02] Sun, W.; Hu, X.: *Reasoning Boolean Operation Based Modeling for Heterogeneous Objects*. Computer-Aided Design, 2002, 34; S. 481–488. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00131-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00131-2).
- [SuYu06] Su, W.; Yuming, Z.; Nanfei, C.: *Study on Adaptive Slicing Algorithm of Functionally Graded Material Components for Rapid Prototyping*. International Technology and Innovation Conference 2006, 2006; S. 372–377. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/cp:20060788>.
- [SwPa92] Sweeney, P. E.; Paternoster, E. R.: *Cutting and Packing Problems: A Categorized, Application-Oriented Research Bibliography*. Journal of the Operational Research Society, 1992; S. 691–706.
- [SwPa95] Swaelens, B.; Pauwels, J.; Vancraen, W.: *Support Generation for Rapid Prototyping*. Proceedings of the 6th International Conference on Rapid Prototyping, 1995; S. 115–121.
- [TaFa98] Tata, K.; Fadel, G.; Bagchi, A.; Aziz, N.: *Efficient Slicing for Layered Manufacturing*. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4; S. 151–167. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549810239003>.
- [Th09] Thomas, D.: *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*. University of Wales, 2009.
- [Ti05] Tiemann, P.: *Gasturbinenschaufel*. EP1207269 B1, 2005.
- [TyBø98] Tyberg, J.; Bøhn, J. H.: *Local Adaptive Slicing*. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4; S. 118–127. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552549810222993>.
- [VaHe13] Valentini, U.; Herrmann, A.: *Requirements Engineering und Projektmanagement*. Springer, Berlin, 2013.
- [VaVi12] Vayre, B.; Vignat, F.; Villeneuve, F.: *Designing for Additive Manufacturing*. Procedia CIRP, 2012, 3; S. 632–637. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.108>.
- [VDI2209] VDI: *3-D-Produktmodellierung - Technische und organisatorische Voraussetzungen - Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen - Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis*. VDI 2209:2009-03, 2009.

- [VDI3405] VDI: *Additive Fertigung-Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. VDI 3405:2014-12, 2014.
- [VDI3405-1] VDI: *Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing - Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen - Güteüberwachung*. VDI3405-1:2013-10, 2013.
- [VDI3405-2] VDI: *Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung*. VDI3405-2:2013-08, 2013.
- [VDI3405-3] VDI: *Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*. VDI3405-3:2015-02, 2015.
- [VeMa04] Venuvinod, P. K.; Ma, W.: *Rapid Prototyping. Laser-based and Other Technologies*. Springer US, Boston, MA, 2004.
- [WaAm99] Watson, P. D.; Am Tobias: *An Efficient Algorithm for the Regular W1 Packing of Polygons in the Infinite Plane*. Journal of the Operational Research Society, 1999, 50; S. 1054–1062.
- [We14] Weilkens, T.: *Systems Engineering mit SysML/UML. Modellierung, Analyse, Design*. dpunkt, Heidelberg, Neckar, 2014.
- [WeVe94] Webb, D.; Verdes, V.; Cassapis, C.: *Computer-Aided Support-Structure Design for Stereolithography Models*. Proceedings of the 5th International Conference on rapid Prototyping, 1994; S. 221–228.
- [WeWi12] Wegner, A.; Witt, G.: *Konstruktionsregeln für das Laser-Sintern*. Zeitschrift Kunststofftechnik (WAK), 2012, 2012; S. 252–277.
- [WiMu13] Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2013.
- [WuWo04] Wu, Y. F.; Wong, Y. S.; Loh, H. T.; Zhang, Y. F.: *Modelling Cloud Data Using an Adaptive Slicing Approach*. Computer-Aided Design, 2004, 36; S. 231–240. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(03\)00097-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00097-6).
- [XuLo99] Xu, F.; Loh, H. T.; Wong, Y. S.: *Considerations and Selection of Optimal Orientation for Different Rapid Prototyping Systems*. Rapid Prototyping Journal, 1999, 5; S. 54–60. DOI: [http://dx.doi.org/10.1108/13552549910267344&iName=master.img-000.jpg&w=170&h=172\)/S/URI>>](http://dx.doi.org/10.1108/13552549910267344&iName=master.img-000.jpg&w=170&h=172)/S/URI>>).
- [Ya14] Yang, Q.: *No Fit Polygon for Nesting Problem Solving with Hybridizing Ant Algorithms*. Journal of Software Engineering and Applications, 2014, 07; S. 433–439. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jsea.2014.75040>.
- [YaCh02] Yang, Z. Y.; Chen, Y. G.; Sze, W. S.: *Layer-Based Machining: Recent Development and Support Structure Design*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2002, 216; S. 979–991.

- [YaZh04] Yan, J. Q.; Zhou, M. Y.; Xi, J. T.: *Adaptive Direct Slicing with Non-Uniform Cusp Heights for Rapid Prototyping*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23; S. 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-002-1523-8>.
- [ZäHa06] Zäh, M.; Hagemann, F.: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. Hanser, München, 2006.
- [ZhLu00] Zhao, Z.; Luc, Z.: *Adaptive Direct Slicing of the Solid Model for Rapid Prototyping*. International Journal of Production Research, 2000, 38; S. 69–83.
- [Zü04] Züst, R.: *Einstieg ins Systems Engineering. Optimale, nachhaltige Lösungen entwickeln und umsetzen*. Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 2004.

8 Anhang

8.1 Abbildungen und Diagramme zu Kapitel 4

Abb. 8-1: Aktivitätsdiagramm der CAD-CAM-Prozesskette

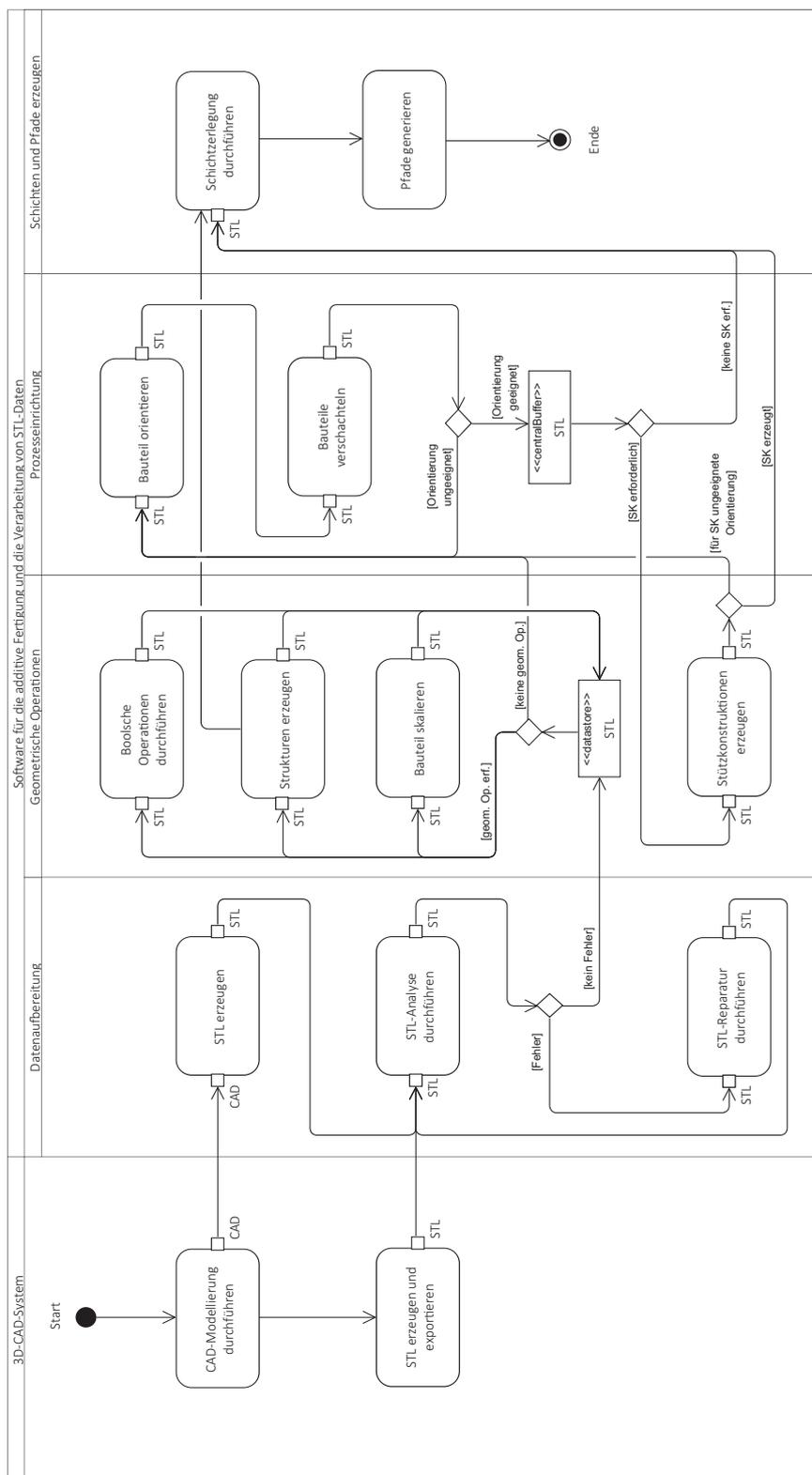


Abb. 8-2: Bauteilgestaltung als Anwendungsfalldiagramm

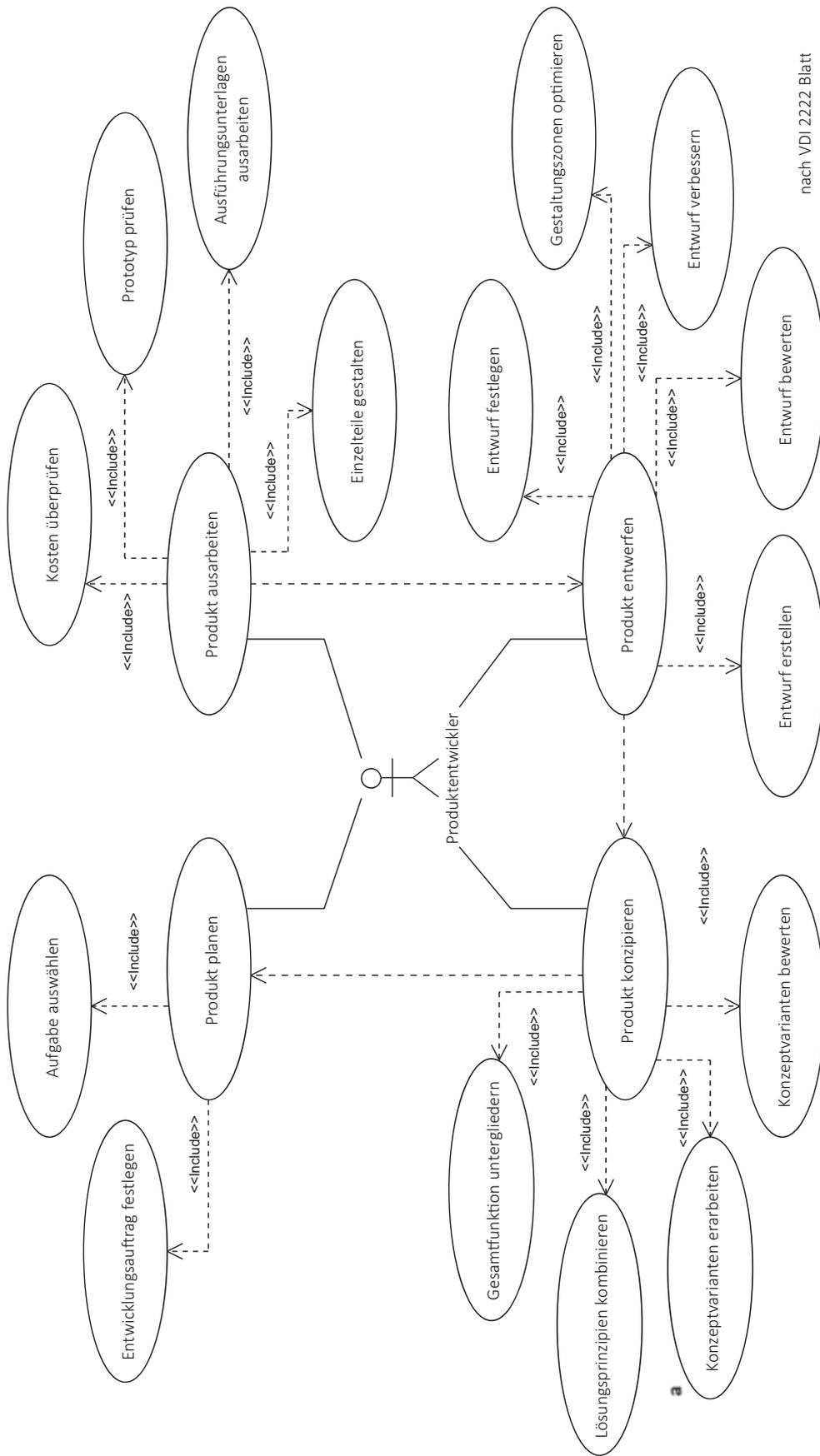


Abb. 8-3: Erzeugung der Fertigungsdaten als Anwendungsfalldiagramm

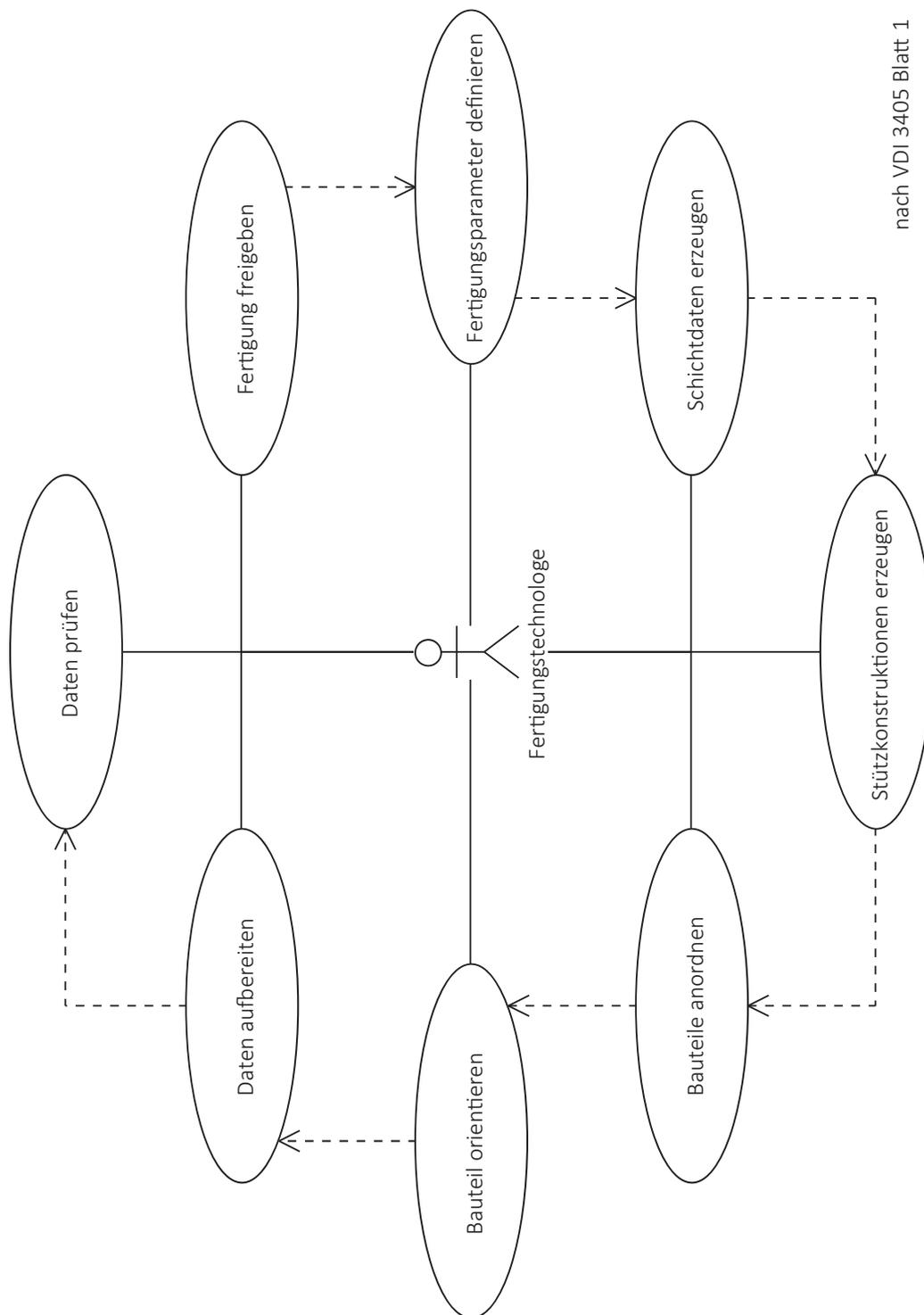


Abb. 8-4: Softwareanforderungen nach SQuaRE als Anforderungsdigramm

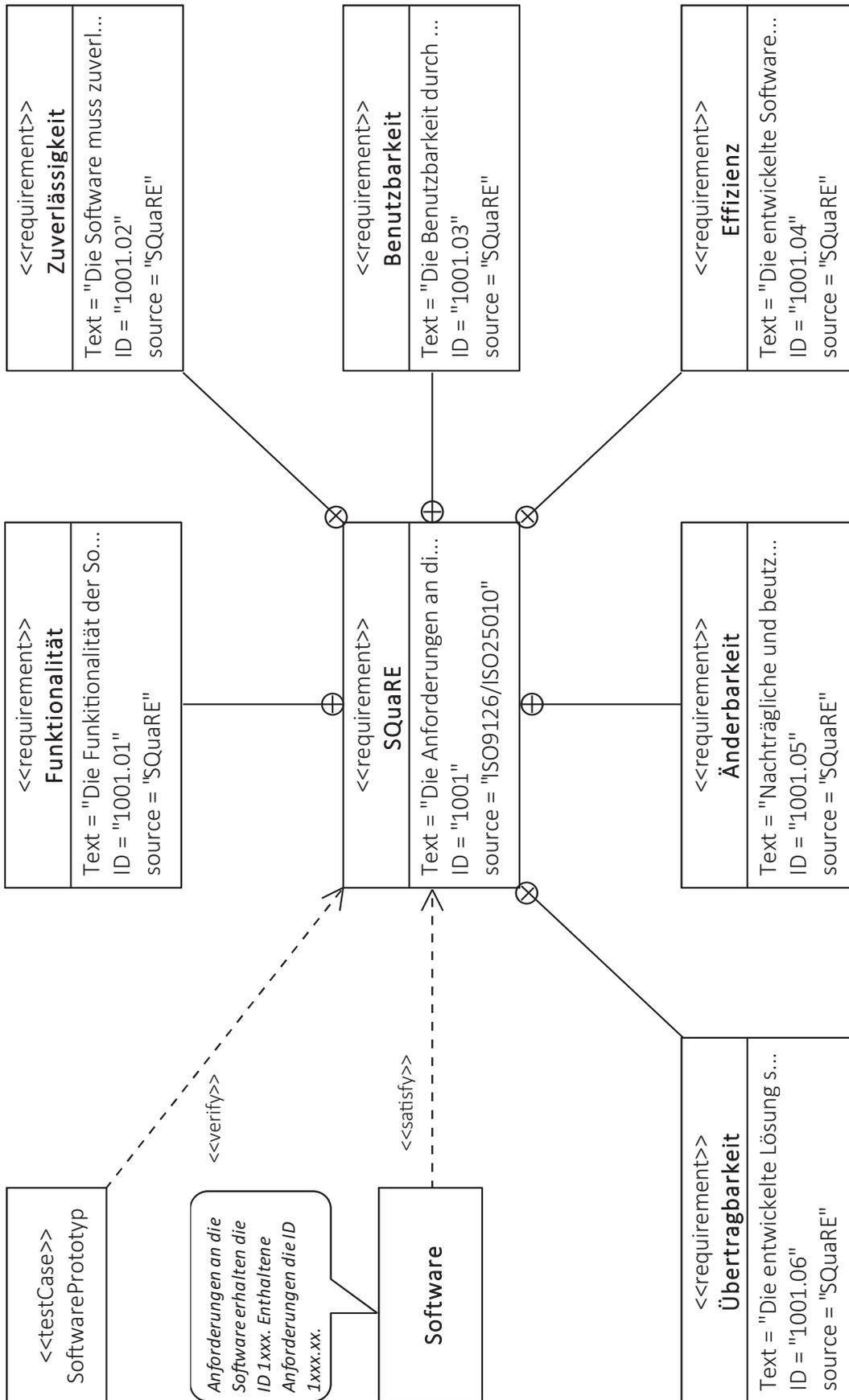


Abb. 8-5: Anforderungen an die AF-Prozesskette

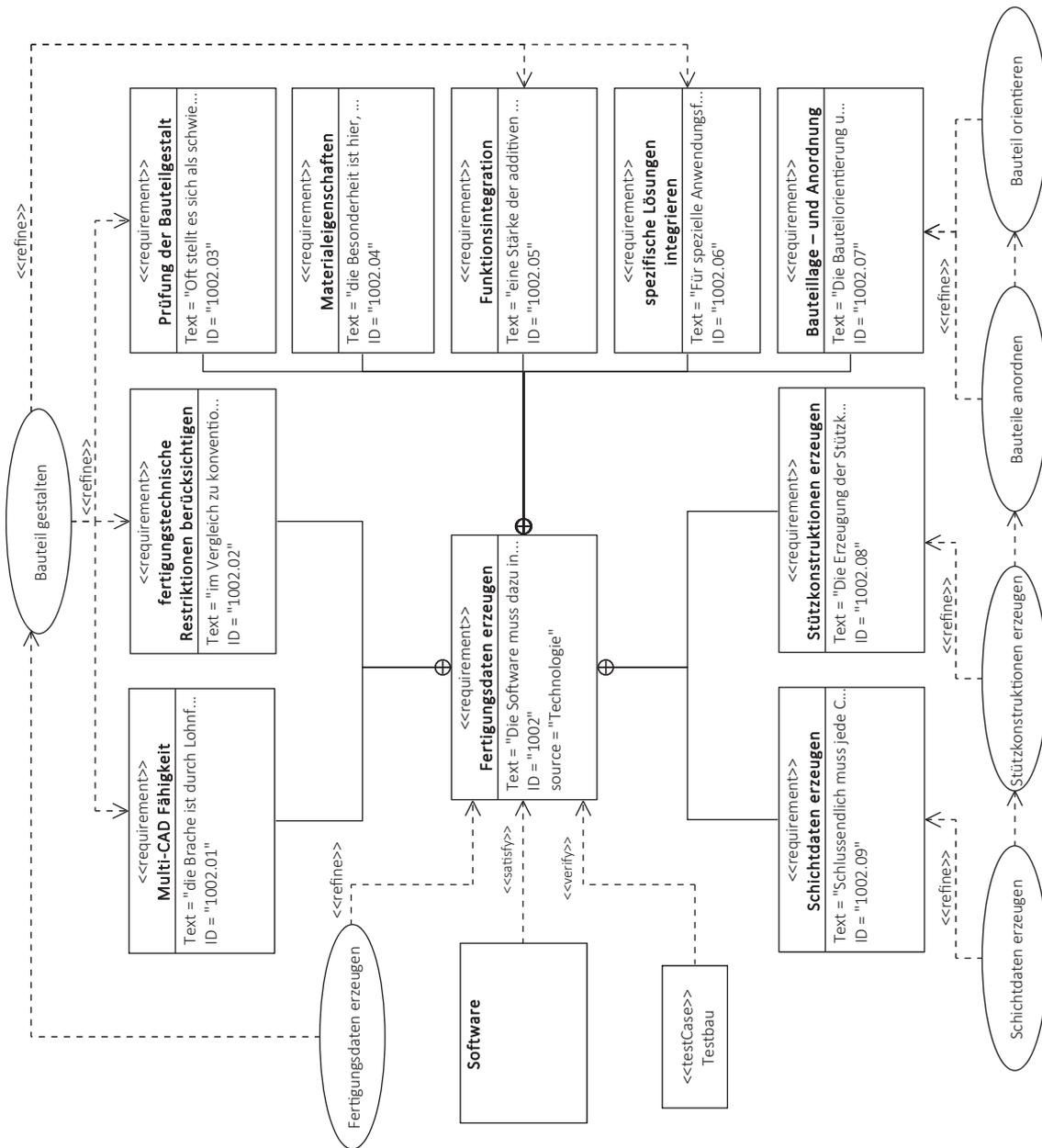


Abb. 8-6: Anforderungsdiagramm nach den Anforderungen von Lipson und Hiller

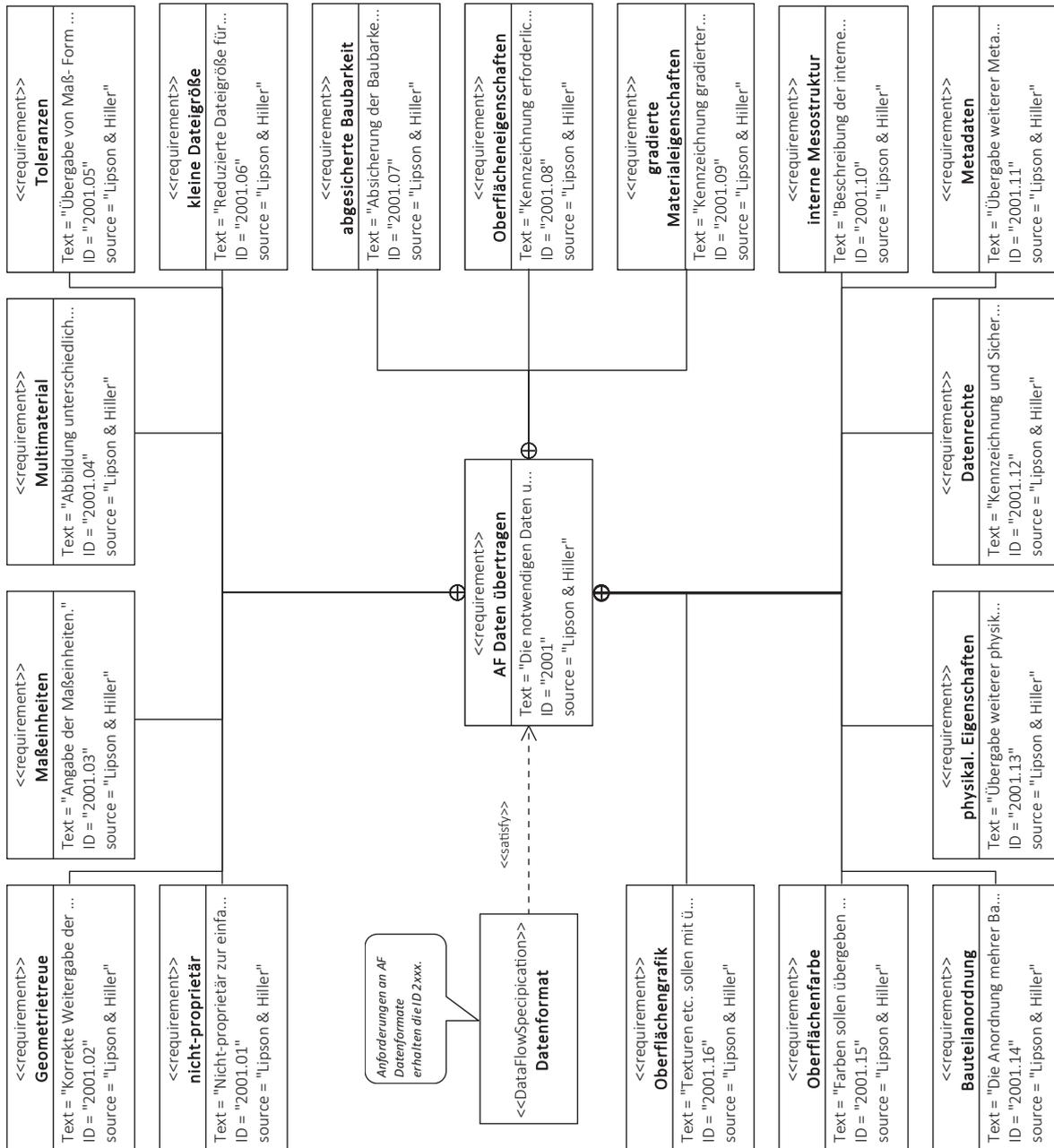
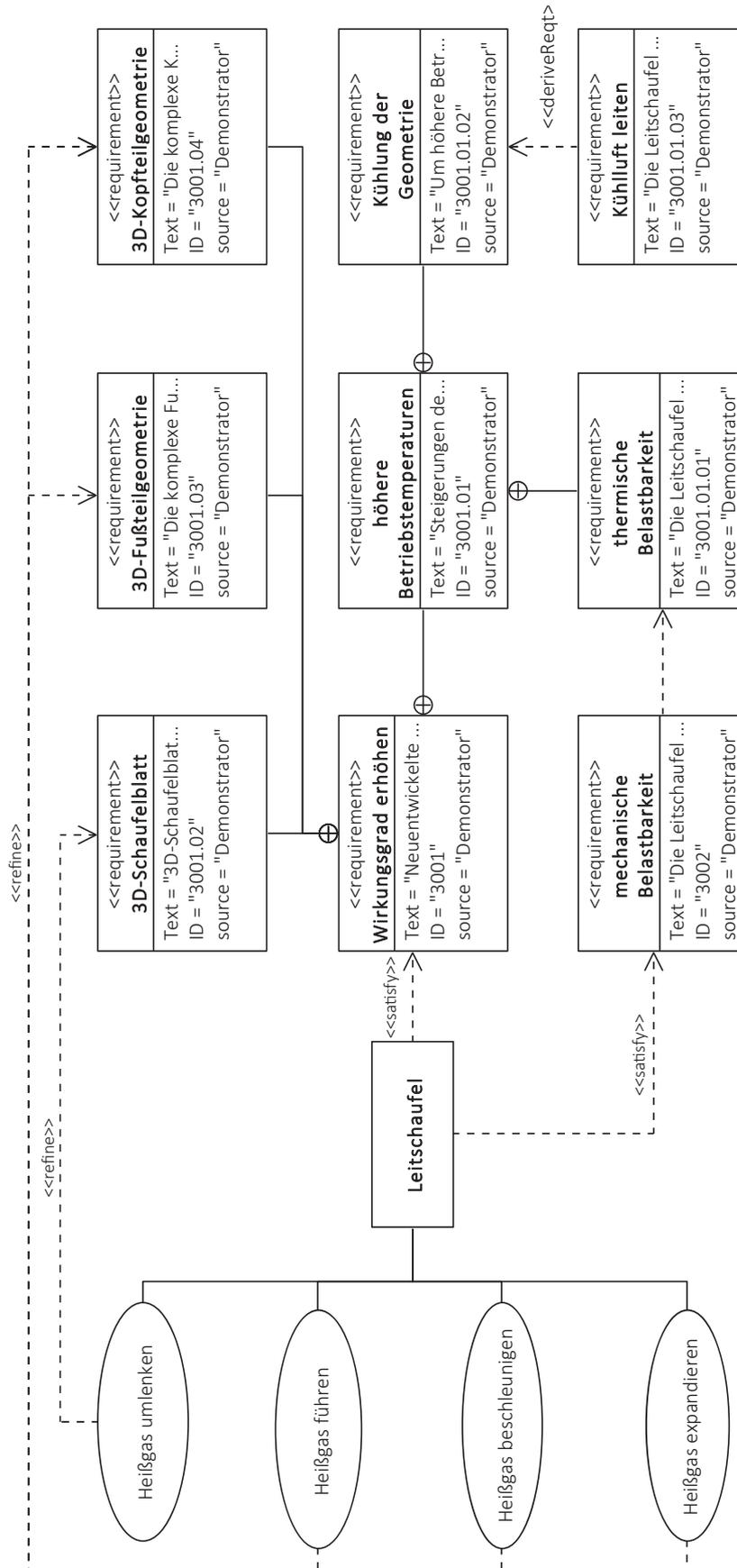


Abb. 8-7: Anforderungsdiagramm für Leitschaukel



8.2 Abbildungen und Diagramme zu Kapitel 6

Abb. 8-9: Schnittdickenprüfung mit PTC-Creo

Informationenfenster: (thickr.indat)

Nr.	Über	Max	Unter	Min	Flächeninhalt
1:	NEIN		NEIN		0.000000
2:	NEIN		NEIN		27.717644
3:	NEIN		NEIN		15.8776659
4:	JA		JA		-39.323722
5:	NEIN		NEIN		93.468872
6:	NEIN		NEIN		5.512934
7:	NEIN		NEIN		5.308116
8:	NEIN		NEIN		5.394412
9:	NEIN		NEIN		5.468092
10:	NEIN		NEIN		5.567539
11:	NEIN		NEIN		5.654340
12:	NEIN		NEIN		5.741283
13:	NEIN		NEIN		5.828358
14:	NEIN		NEIN		5.915298
15:	NEIN		NEIN		6.002607
16:	NEIN		NEIN		6.089645
17:	NEIN		NEIN		6.177171
18:	NEIN		NEIN		6.264805
19:	NEIN		NEIN		6.352558
20:	NEIN		NEIN		6.440409
21:	NEIN		NEIN		6.528378
22:	NEIN		NEIN		6.624371
23:	NEIN		NEIN		46.785547
24:	NEIN		NEIN		147.495278
25:	NEIN		NEIN		29.679706
26:	NEIN		NEIN		35.308414
27:	NEIN		NEIN		25.937830
28:	NEIN		NEIN		25.885265
29:	NEIN		NEIN		26.777194

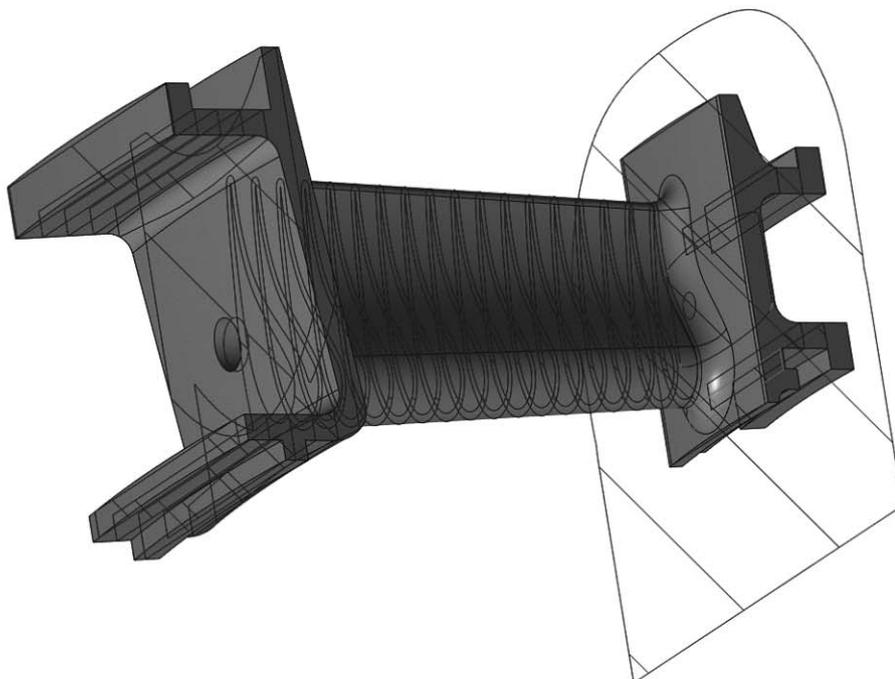


Abb. 8-10: AMP-Musterbericht Seite 1 von 2

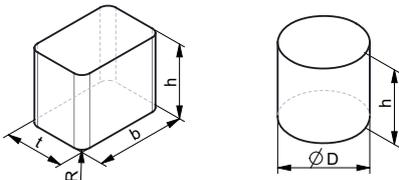
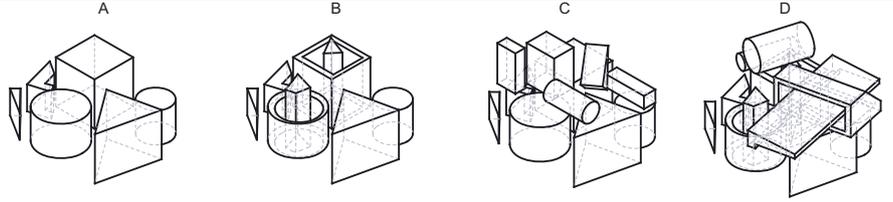
Additive Manufacturing Parameters	www.uni-due.de/cae ipe-amt@uni-due.de	Universität Duisburg-Essen						
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 45%; border: none;"> Universität Duisburg-Essen Alexander Martha +49 203 379 12345 alexander.martha@uni-due.de </td> <td style="width: 5%; border: none; text-align: center;"> >>>> </td> <td style="width: 50%; border: none; text-align: center;"> ipe <i>institute of product engineering</i> </td> </tr> <tr> <td style="border: none;"> Prozessbenennung: Kennzahl: </td> <td style="border: none;"></td> <td style="border: none; text-align: center;"> IPE-Musterprozess 2014-3-5-IPE-Musterprozess </td> </tr> </table>			Universität Duisburg-Essen Alexander Martha +49 203 379 12345 alexander.martha@uni-due.de	>>>>	ipe <i>institute of product engineering</i>	Prozessbenennung: Kennzahl:		IPE-Musterprozess 2014-3-5-IPE-Musterprozess
Universität Duisburg-Essen Alexander Martha +49 203 379 12345 alexander.martha@uni-due.de	>>>>	ipe <i>institute of product engineering</i>						
Prozessbenennung: Kennzahl:		IPE-Musterprozess 2014-3-5-IPE-Musterprozess						
1	Stand:	Mittwoch, 5. März 2014						
1.1	Allgemeine Hinweise:	<i>Bei der Verarbeitung muss auf ... Achtung ... weiteres ...</i>						
2	Additives Fertigungsverfahren:	Laser-Strahlschmelzen (LBM)						
2.1	Maschinenbezeichnung:	EOSINT M270						
2.2	Maschinenhersteller:	EOS						
2.3	Maschinenstandort:	Rapid Technology Center Duisburg						
2.4	Modifizierte Versuchsanlage:	Nein						
3	Material:	Hastelloy X						
3.1	Hinweise zum Material:	<i>Bei der Verarbeitung von Hastelloy X sollten die Parameter ... darüberhinaus ...</i>						
4	Bauraumtyp:	Quaderförmig						
4.1	Bauraumabmessungen [mm]:	Breite: 250; Tiefe: 250; Höhe: 210; Radius: 0						
4.2	Maximale Bauteilabmessungen [mm]:	Breite: 250; Tiefe: 250; Höhe: 189,0; Radius: 0						
4.3								
5	Prozessbenennung:	IPE-Musterprozess						
5.1	Kennzahl:	2014-3-5-IPE-Musterprozess						
5.2	Schichtdicke [mm]:	0,02						
5.3	Schrumpffaktor in z-Richtung:	1,1						
5.4	Schrumpffaktor in x-y-Richtung:	1						
5.5	Bauraumtemperierung [°C]:	80						
5.6	Hinweise zum Prozess:	Folgendes ist bei ... zu beachten ... - ... - ... - ...						
6	Simultane Fertigung:	zulässig						
6.1	Verschachtelungstyp:	B						
6.2	Mindestabstand zwischen Bauteilen [mm]:	2						
6.3								
D:\UDE\AMP\2014-3-5-IPE-Musterprozess\Excel\AMP-2014-3-5-IPE-Musterprozess-export.xlsx 1 von 2								

Abb. 8-11: AMP-Musterbericht Seite 2 von 2

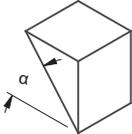
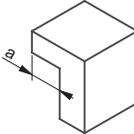
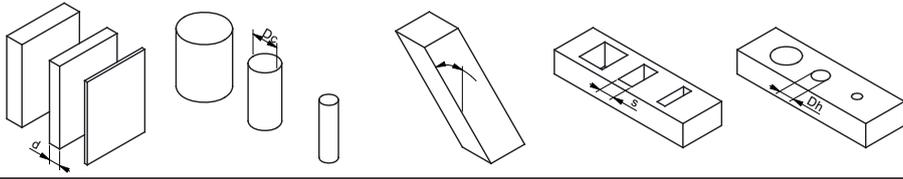
Additive Manufacturing Parameters		www.uni-due.de/cae ipe-amt@uni-due.de		Universität Duisburg-Essen	
7	Stützkonstruktionen erforderlich:	ja			
7.1	Material der Stützkonstruktionen:	Hastelloy X			
7.2	Schichtdicke der Stützkonstruktionen [mm]:	0,04			
7.3	Üblicher Abstand Bauteil / Bauplattform [mm]:	10			
7.4	Maximaler Überhangwinkel [Grad]:	44			
7.5	Maximaler Überhang [mm]:	0,4			
7.6	Hinweise zu Stützkonstruktionen:	Um Stützkonstruktionen sicher entfernen zu können müssen die			
7.7	Überhangwinkel:			Überhang:	
8	Geometrie				
8.1	Hinweise zu Außenmaßen:	Richtungabhängigkeit: Wände parallel zum Beschichter werden bis einschl. 0,7 mm umgeknickt			
8.2	Parameter zu Außenmaßen:	Wände orthogonal zum Beschichter ab 0,2 mm Liste: Parameter: Wandstärke-Fein [mm]: Minimalwert: 0,7; Maximalwert: - Kommentar: Untergrenze für Wandstärken Parameter: Wandstärke-Orthogonal [mm]: Minimalwert: 0,2; Maximalwert: - Kommentar: Orthogonal zum Beschichter angeordnete Wände können dünner ausgeführt werden Parameter: Wandstärke-Robust [mm]: Minimalwert: 1; Maximalwert: - Kommentar: Bereich für eine "robuste" Herstellung von Wänden			
8.3	Hinweise zu Außendurchmessern und-radien:	Feld für allgemeine Kommentare, für die Parameteringabe bitte die Tabellenfunktion nutzen!			
8.4	Parameter zu Außendurchmessern und-radien:	Liste:			
8.5	Hinw. zu benutzerdef. Geometrieparametern:	Feld für allgemeine Kommentare, für die Parameteringabe bitte die Tabellenfunktion nutzen!			
8.6	Benutzerdefinierte Geometrieparameter:	Liste:			
8.7	Hinweise zu Innenmaßen:	Feld für allgemeine Kommentare, für die Parameteringabe bitte die Tabellenfunktion nutzen!			
8.8	Parameter zu Innenmaßen:	Liste:			
8.9	Hinweise zu Innendurchmessern und-radien:	Feld für allgemeine Kommentare, für die Parameteringabe bitte die Tabellenfunktion nutzen!			
8.10	Parameter zu Innendurchmessern und-radien:	Liste:			
8.11	Außenmaße	Außendurchmesser	Benutzerdefiniert	Innenmaße	Innendurchmesser
					
D:\UDE\AMP\2014-3-5-IPE-Musterprozess\Excel\AMP-2014-3-5-IPE-Musterprozess-export.xlsx					2 von 2

Abb. 8-12: AMP Registerkarte „Allgemeine Informationen“

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

ipe Institut für Produkt Engineering

Open-Minded 2015-4-15

Allgemeine Informationen | Prozessinformationen | Geometrie | Weitere Hinweise | Datenaustausch und Info

Anlage und Material

Additives Fertigungsverfahren
 Maschinenbezeichnung
 Maschinenhersteller
 Material
 Maschinenstandort

Modifizierte Versuchsanlage

Kontakt / Verantwortlich

Institution / Firma
 Verantwortlicher Fertigungstechnologe
 Telefonnummer
 eMail

Bauraumklassifizierung

Quaderförmiger Bauraum

Bauraum Bauteil Max. (inkl. Schrumpf)

Breite b mm
 Tiefe t mm
 Höhe h mm
 Radius R mm

Zylinderförmiger Bauraum

Bauraum Bauteil Max. (inkl. Schrumpf)

Durchmesser D mm
 Höhe h mm

Abb. 8-13: AMP Registerkarte „Prozessinformationen“

UNIVERSITÄT DUISBURG ESSEN

ipe Institut für Produkt Engineering

Open-Minded 2015-4-15

Allgemeine Informationen | Prozessinformationen | Geometrie | Weitere Hinweise | Datenaustausch und Info

Prozess

Prozessbenennung Kennzahl
 Kurzname 2015-4-15
 Standard Schichtdicke 0,020 mm
 Bauraumtemperierung 25,000 °C
 Schrumpffaktor in Richtung z 1,00 x-y 1,00

Simultane Fertigung zulässig
 Mindestabstand zwischen einzelnen Bauteilen 2,000 mm
 Stützkonstruktionen (SK) erforderlich

Stützkonstruktionen

Material der SK
 Schichtdicke der Stützkonstruktionen 0,040 mm
 Üblicher Abstand zwischen Bauteilen und Bauplattform 10,000 mm

Maximaler Überhangwinkel α ohne SK 45,0 Grad
 Maximaler Überhang a ohne SK 1,000 mm

Klassifizierung der Verschachtelung

Verschachtelung Typ A: nebeneinander
 Verschachtelung Typ B: nebeneinander, ineinander
 Verschachtelung Typ C: nebeneinander, übereinander
 Verschachtelung Typ D: nebeneinander, übereinander, ineinander

Abb. 8-14: AMP Registerkarte „Geometrie“

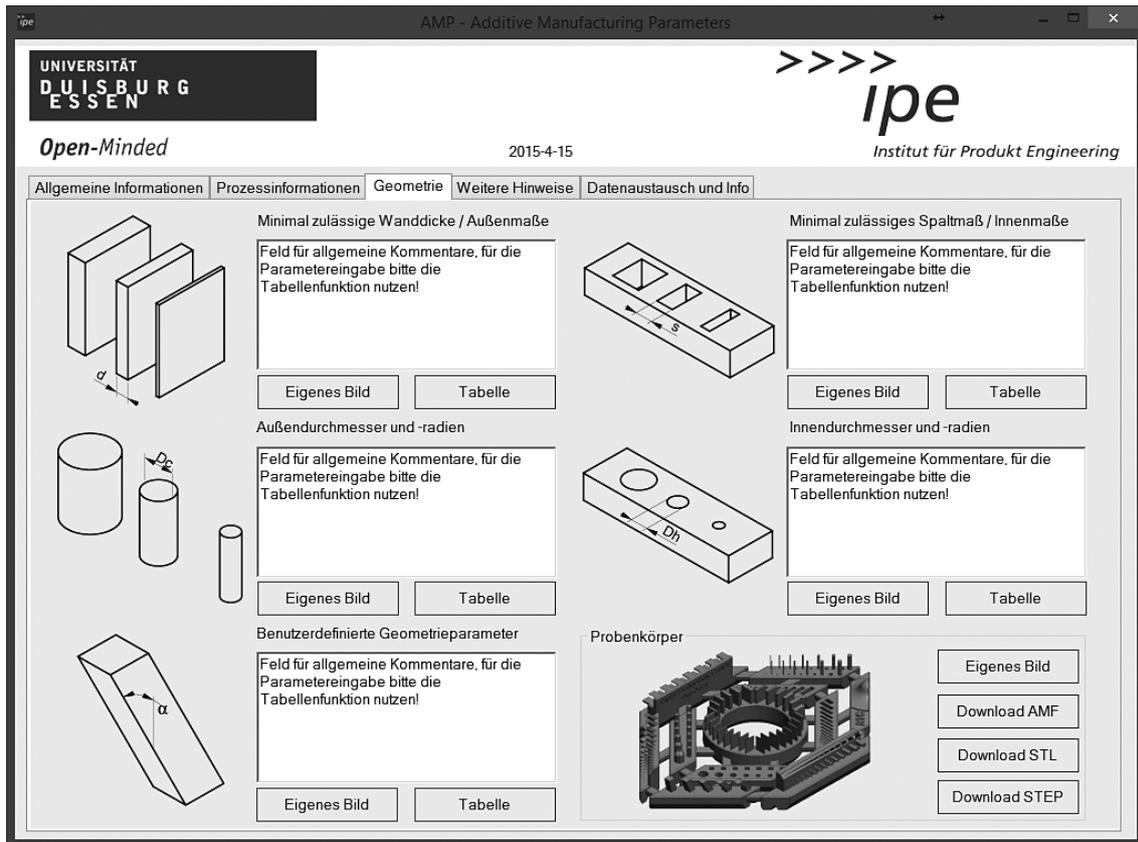


Abb. 8-15: AMP Tabellenfunktion

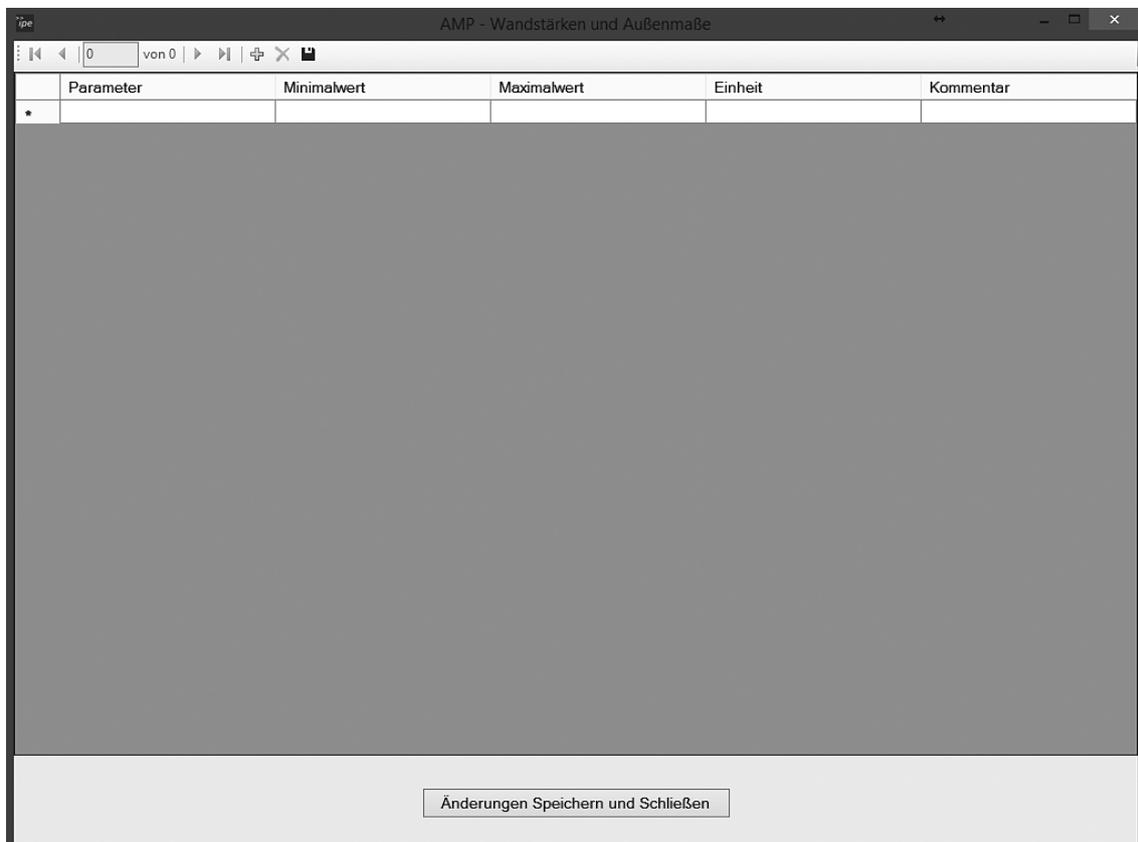


Abb. 8-16: AMP Registerkarte „Weitere Hinweise“

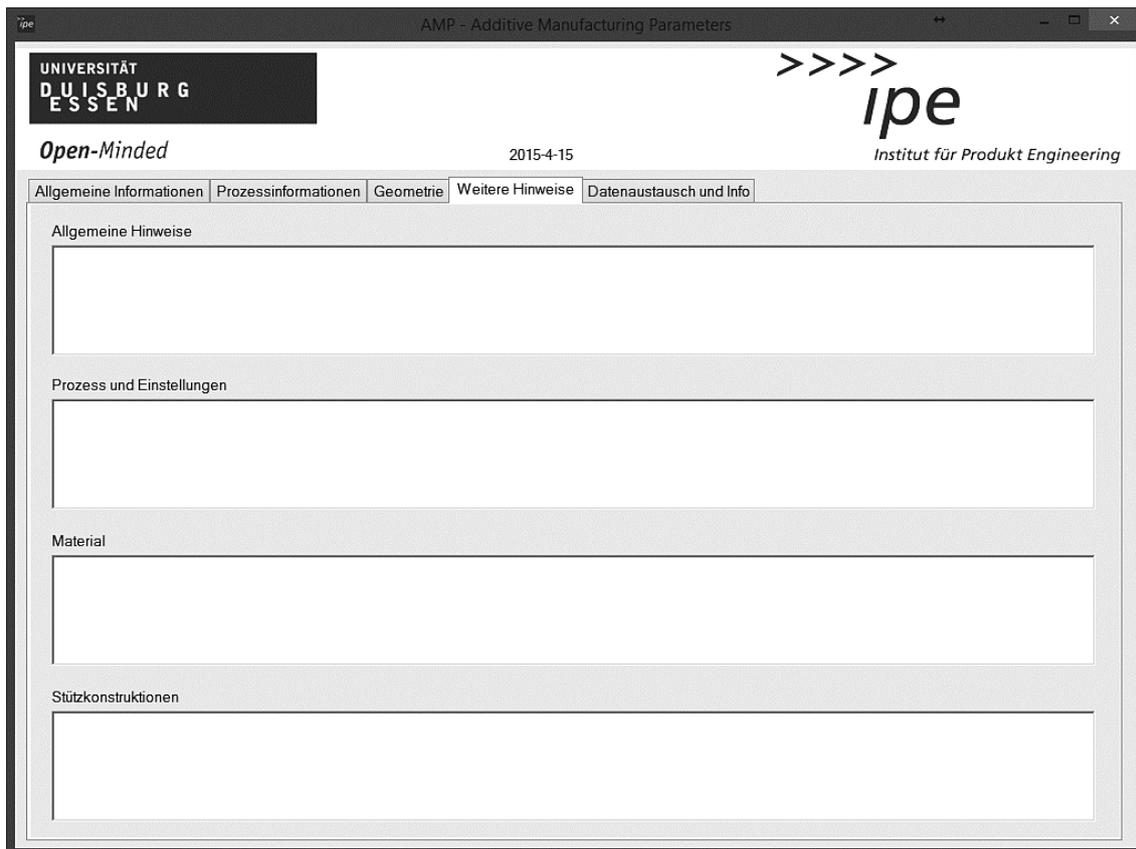
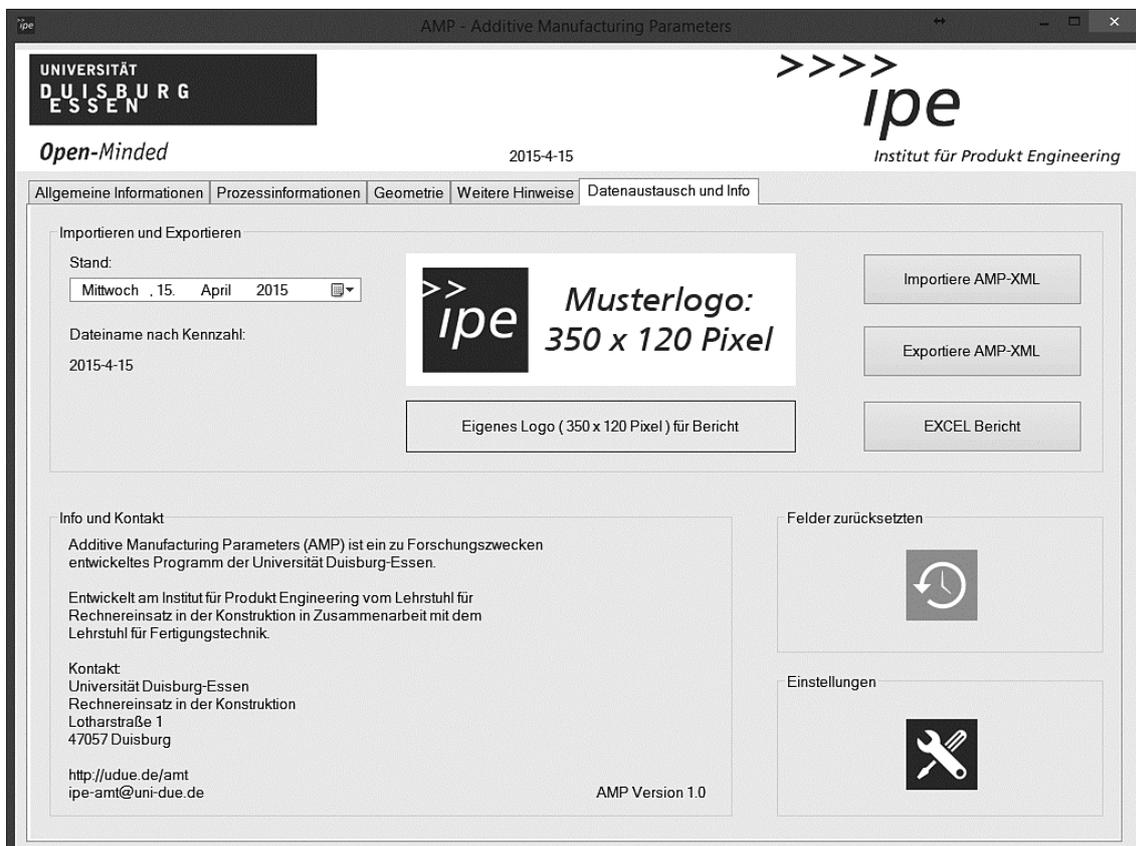


Abb. 8-17: AMP Registerkarte „Datenaustausch und Info“

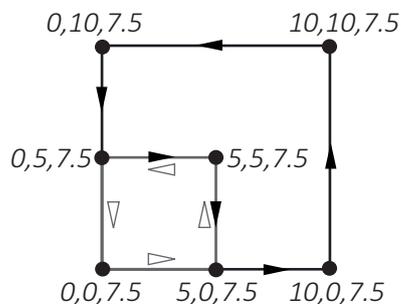
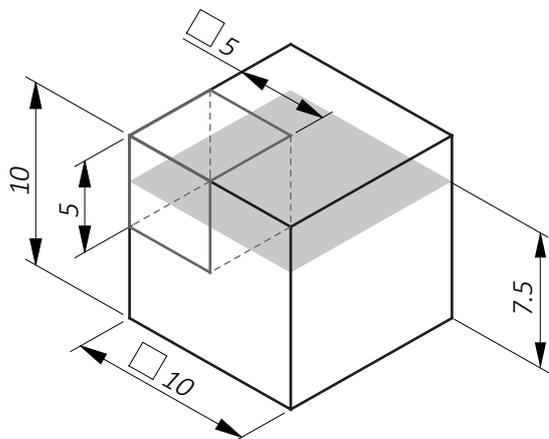


8.3 AMLF-Beispieldatei

Abb. 8-18: AMLF-Beispielbauteil und Beispieldatei

Bauteil mit zwei Materialbereichen

Schicht mit zwei Materialbereichen



```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<amlf unit="mm">
  <metadata type="Company">Universität Duisburg-Essen</metadata>
  <metadata type="CAD-System">PTC Creo 3.0</metadata>
  <metadata type="DrawingNumber">2015-05-02</metadata>
  <metadata type="Designer">HSM</metadata>
  <materials count="2">
    <material id="001">
      <metadata type="Vendor">UDE</metadata>
      <metadata type="Short Name">MATERIAL001</metadata>
      <metadata type="Material Number">1.234</metadata>
      <metadata type="Description">Edelstahl</metadata>
      <name>Edelstahlmaterial 001</name>
      <type>Solid</type>
      <density unit="g/cubic cm">7.8</density>
    </material>
    <material id="002">
      <metadata type="Vendor">UDE</metadata>
      <metadata type="Short Name">MATERIAL002</metadata>
      <metadata type="Material Number">1.234</metadata>
      <metadata type="Description">Filterstruktur</metadata>
      <name>Edelstahlmaterial 001, Porös</name>
      <type>Porous</type>
      <density unit="g/cubic cm">3</density>
    </material>
  </materials>
  <objects count="1">
    <object id="001">
      <name>Beispielbauteil</name>
      <boundingbox>
        <bottomleft>
          <x>0</x>
          <y>0</y>
          <z>0</z>
        </bottomleft>
        <topright>
          <x>10</x>
          <y>10</y>
          <z>10</z>
        </topright>
      </boundingbox>
      <layercount>20</layercount>
    </object>
  </objects>
</amlf>

```

```

<layer height="0.5">
<layerthickness>0.5</layerthickness>
  <region>
    <externalcontour>
      <material>001</material>
      <polygon>
        <coordinates>
          0,0,10,0,10,10,0,10,0,0</coordinates>
        </polygon>
      </externalcontour>
      <area>
        <material>001</material>
      </area>
      <internalcontour>
      </internalcontour>
    </region>
  </layer>
<layer height="1">
<layerthickness>0.5</layerthickness>
  <region>
    <externalcontour>
      <material>001</material>
      <polygon>
        <coordinates>
          0,0,10,0,10,10,0,10,0,0</coordinates>
        </polygon>
      </externalcontour>
      <area>
        <material>001</material>
      </area>
      <internalcontour>
      </internalcontour>
    </region>
  </layer>
<layer height="1.5-4.5">
  ...
</layer>
<layer height="5">
<layerthickness>0.5</layerthickness>
  <region>
    <externalcontour>
      <material>001</material>
      <polygon>
        <coordinates>
          5,0,10,0,10,10,0,10,0,5,5,5,5,0
        </coordinates>
      </polygon>
    </externalcontour>
    <area>
      <material>001</material>
    </area>
  </region>
  <region>
    <area>
      <material>002</material>
      <polyline>
        <coordinates>0,0.5,5,0.5</coordinates>
      </polyline>
      <polyline>
        <coordinates>5,1,0,1</coordinates>
      </polyline>
      <polyline>
        <coordinates>0,1.5,5,1.5</coordinates>
      </polyline>
      <polyline>
        <coordinates>5,2,0,2</coordinates>
      </polyline>
      <polyline>
        <coordinates>0,2.5,5,2.5</coordinates>
      </polyline>
      <polyline>
        <coordinates>5,3,0,3</coordinates>
      </polyline>
    </area>
  </region>

```

```

        <coordinates>0,3.5,5,3.5</coordinates>
    </polyline>
    <polyline>
        <coordinates>5,4,0,4</coordinates>
    </polyline>
    <polyline>
        <coordinates>0,4.5,5,4.5</coordinates>
    </polyline>
    </area>
</region>
</layer>
<layer height="5.5">
<layerthickness>0.5</layerthickness>
    <region>
        <externalcontour>
            <material>001</material>
            <polygon>
                <coordinates>
                    5,0,10,0,10,10,0,10,0,5,5,5,0
                </coordinates>
            </polygon>
        </externalcontour>
        <area>
            <material>001</material>
        </area>
    </region>
    <region>
        <area>
            <material>002</material>
            <polyline>
                <coordinates>0.5,5,0.5,0</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>1,0,1,5</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>1.5,5,1.5,0</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>2,0,2,5</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>2.5,5,2.5,0</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>3,0,3,5</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>3.5,5,3.5,0</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>4,0,4,5</coordinates>
            </polyline>
            <polyline>
                <coordinates>4.5,5,4.5,0</coordinates>
            </polyline>
        </area>
    </region>
</layer>
<layer height="6-10">
    ...
</layer>
</object>
</objects>
<constellation instances="2">
    <instance id="001">
        <objectid>001</objectid>
        <thickness>0.5</thickness>
        <position>
            <translation>
                <x>0</x>
                <y>0</y>
                <z>0</z>
            </translation>
            <rotation>0</rotation>
        </position>
    </instance>
</constellation>

```

```
</instance>
    <instance id="002">
    <objectid>001</objectid>
    <thickness>0.5</thickness>
    <position>
        <translation>
            <x>12</x>
            <y>0</y>
            <z>0</z>
        </translation>
        <rotation>0</rotation>
    </position>
    </instance>
</constellation>
</amlf>
```

Erläuterung: gemäß der Abb. 8-18 handelt es sich um ein Bauteil mit zwei Materialbereichen. Der kleinere Bereich erhält eine Gitterstruktur, die schichtweise abwechselnd in X- und Y-Richtung verläuft. Zur Vereinfachung sind in dem Quellcode die sich wiederholenden Schichten ausgespart. Das Bauteil wird insgesamt zweimal auf der Bauplattform positioniert. Einmal am Punkt 0,0,0 und einmal mit 12 mm Abstand in X-Richtung versetzt.

Veröffentlichungen

Zeitschriften

Martha, A.; Köhler, P.: *Ansätze zur Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit bei generativen Verfahren durch Optimierung des Pre-Processes*. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, 2011.

Martha, A.; Sehrt, J.; Benra, F.-K.; Köhler, P.: *Auslegung, Konstruktion und Fertigung von strömungsmechanischen Funktionsprototypen mittels Rapid Manufacturing*. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, 2012.

Martha, A.; Köhler, P.: *Approaches for the Layer Data Generation for Special Additive Manufacturing Applications*. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013, S. 76–83.

Reinhardt, T.; Martha, A.; Witt, G.; Köhler, P.: *Preprocess-Optimization for Polypropylene Laser Sintered Parts*. Computer-Aided Design and Applications, 2013, S. 49–61. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2013.834138>.

Sehrt, J. T.; Martha, A.; Witt, G.: *Direct Slicing Approach for the Production Of Per-fused Components by Laser Beam Melting*. The South African Journal of Industrial Engineering, 2014, 25; S. 96. DOI: <http://dx.doi.org/10.7166/25-1-701>.

Manoharan, T.; Humpa, M.; Martha, A.; Köhler, P.: *Knowledge Integration in the CAD-CAM Process Chain*. Computer-Aided Design and Applications, 2015. Zur Veröffentlichung angenommen.

Tagungen

Martha, A.; Köhler, P.: *Ansatz zur multiziel-optimierten Bauraumnutzung für Anwendungen der RP-Technologie*. 3D-NordOst 2010 - 13. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 2010.

Martha, A.; Köhler, P.: *Ansätze zur Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit bei generativen Verfahren durch Optimierung des Pre-Processes*. Rapid.Tech - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie, 2011.

Martha, A.; Sehrt, J.; Benra, F.-K.; Köhler, P.: *Auslegung, Konstruktion und Fertigung von strömungsmechanischen Funktionsprototypen mittels Rapid Manufacturing*. Rapid.Tech - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie, 2012.

Martha, A.; Klemme, U.; Köhler, P.: *Interdisziplinäre Prototypenentwicklung am Beispiel eines Seilroboters*. Entwerfen Entwickeln Erleben. Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung, 2012; S. 591–608.

Sehrt, J.; Martha, A.; Witt, G.: *Strategy for the Manufacturing of Perfused Parts Using Laser Beam Melting*. Conference & Proceedings of the 13th RAPDASA annual international Conference: Additive Manufacturing in Industry, 2012.

Martha, A.; Köhler, P.: *Definierte Erzeugung von Schichtdaten für besondere Anwendungen*. Rapid.Tech - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie, 2013.

Reinhardt, T.; Martha, A.; Witt, G.; Köhler, P.: *Preprocess Optimization for Polypropylene Laser Sintered Parts*. International CAD Conference and Exhibition, 2013.

Martha, A.; Köhler, P.: *Direct Slicing of Surface Models in CAD Systems for Rapid Manufacturing Applications*. International CAD Conference and Exhibition, 2013.

Köhler, P.; Martha, A.: *Additive Manufacturing - Unterstützung der CAD/CAM-Prozesskette*. 3D-NordOst 2014 - 17. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 2014.

Martha, A.; Manoharan, T.; Köhler, P.: *Additive Manufacturing – Integration von Fertigung und Produktentwicklung*. Entwerfen Entwickeln Erleben, 2014, S. 331–343.

Martha, A.; Köhler, P.; Paul, L.: *Unterstützung der additiven Fertigung durch CAD-CAM Integration*. Rapid.Tech - Fachmesse und Anwendertagung für Rapid-Technologie, 2014.

Manoharan, T.; Humpa, M.; Martha, A.; Köhler, P.: *Knowledge Integration in the CAD-CAM Process Chain*. International CAD Conference and Exhibition, 2015.

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Kontakt über soziale Netzwerke:

LinkedIn: <https://de.linkedin.com/in/alexander-martha-2b1539b0>

XING: [https://www.xing.com/profile/Alexander Martha2](https://www.xing.com/profile/Alexander_Martha2)

