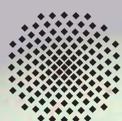
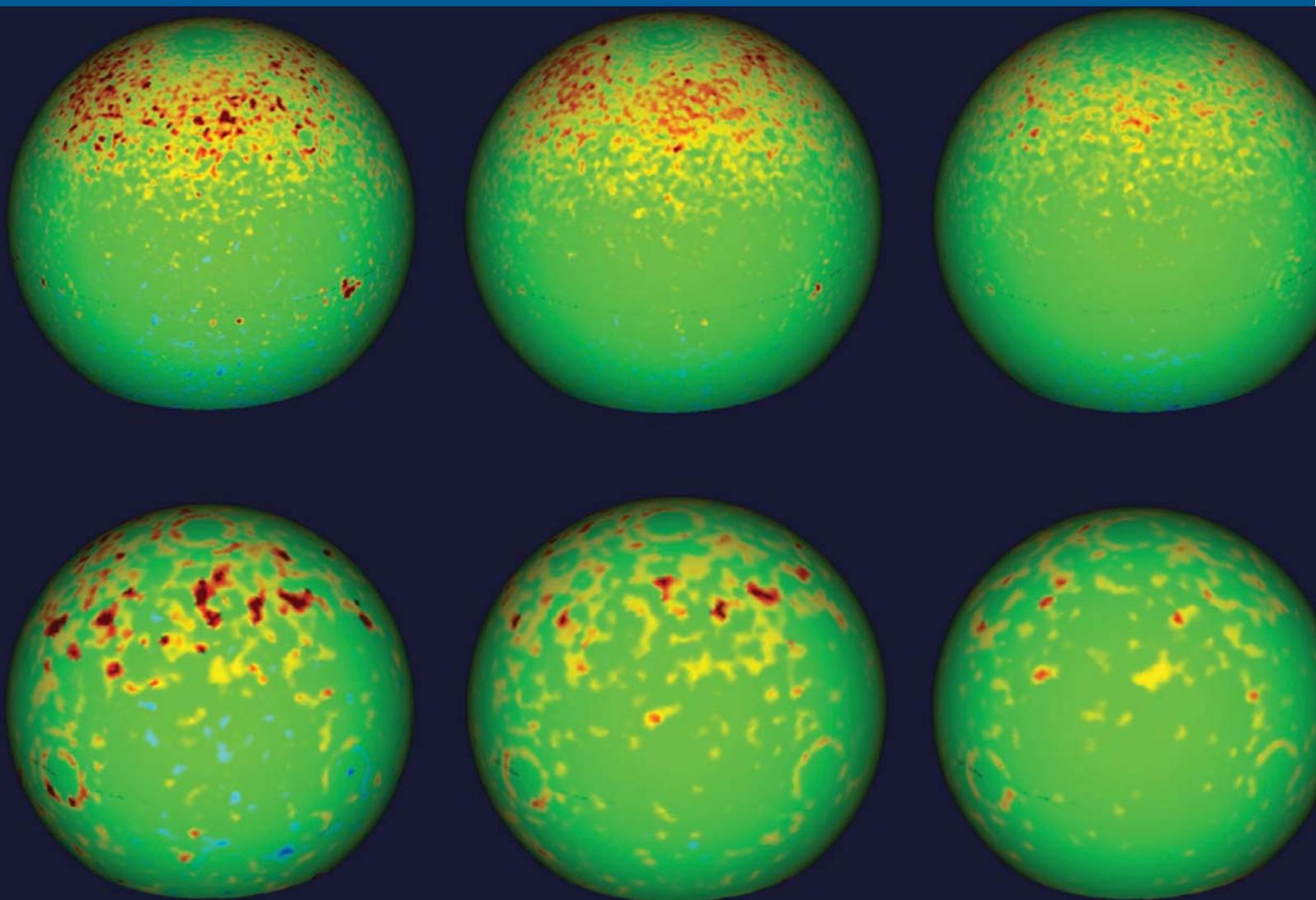


JULIA KROLL

---

# Aufgabenangepasste, kontrollierte Oberflächenextraktion aus 3D-Computer- tomographiedaten



**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Julia Kroll

**Aufgabenangepasste, kontrollierte  
Oberflächenextraktion aus 3D-Computer-  
tomographiedaten**

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99  
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

**STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG****Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl  
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart  
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)  
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Autorin

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-0672-8

**D 93**

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart  
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2014

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-25 00  
Telefax 07 11 9 70-25 08  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

## GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper



# Aufgabenangepasste, kontrollierte Oberflächenextraktion aus 3D-Computertomographiedaten

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
Julia Kroll  
aus Dresden

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Thomas Ertl

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2013

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen  
(ISW)

der Universität Stuttgart

2014



---

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Alexander Verl für die Unterstützung und Bestärkung bei der Durchführung meiner Arbeit bedanken. Herrn Prof. Thomas Ertl danke ich für die Übernahme des Mitberichts.

Einen herzlichen Dank möchte ich meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen der Abteilung Bild- und Signalverarbeitung unter der Leitung von Herrn Markus Hüttel aussprechen. Dies gilt besonders für Frau Ira Effenberger, die mich bei allen Schritten der Umsetzung meiner Arbeit unterstützte und mir stets sowohl mit fachlichem als auch mit persönlichem Rat zur Seite stand. Herrn Marius Pflüger danke ich für den motivierenden Austausch und die gemeinsamen Zielsetzungen, die ein großer Ansporn zur Fertigstellung der Arbeit waren. Bei Herrn Prof. Nico Blessing bedanke ich mich außerdem für die schnelle und kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Die vorliegende Entwicklung wurde zudem von Firma Werth Messtechnik anwendungstechnisch unterstützt. Daher geht mein Dank zusätzlich an Herrn Dr. Ralf Christoph für die konstruktiven fachlichen Diskussionen und an sein Entwicklerteam für die Unterstützung bei der Softwareumsetzung.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir in allen Lebenslagen beiseite steht und mich immer an das Wesentliche erinnert. Meinem Vater danke ich zudem für die sorgfältige Korrektur der Arbeit. Schließlich möchte ich von ganzem Herzen meinem Freund Martin Denecke danken, der mit viel Einsatz und Geduld entscheidend zur Fertigstellung meiner Arbeit beigetragen hat.

Stuttgart, Januar 2014

Julia Kroll



---

# Kurzzinhalt

Mit der industriellen Computertomographie (CT) steht der modernen Qualitätssicherung ein Instrument zur Verfügung, das die zerstörungsfreie und vollständige Erfassung von Bauteilen ermöglicht. Als Ergebnis liefert sie 3D-Volumendaten mit allen geometrischen und materialbezogenen Strukturen, welche die Basis für verschiedenste Anwendungsbereiche der Qualitätskontrolle darstellen. Deshalb wird die CT heutzutage bereits an vielen Stellen im Produktentstehungsprozess zur Qualitätsprüfung, aber auch zunehmend für die dimensionelle Messung von Bauteilen eingesetzt. Um derartige messtechnische Auswertungen durchführen zu können, bedarf es der Bestimmung von 3D-Oberflächendaten, welche die Materialgrenzen des zu untersuchenden Bauteils beschreiben. Aktuelle Standardverfahren hierzu weisen in der Praxis jedoch entscheidende Nachteile auf, die dazu führen, dass die CT als Messverfahren für viele Bauteiltypen und Mess- und Prüfaufgabenstellungen bislang nicht anwendbar ist oder einer Vielzahl zusätzlicher Bearbeitungsschritte bedarf, um speziellen Anforderungen gerecht zu werden. In dieser Arbeit wird ein neuartiges Vorgehen zur Extraktion von 3D-Oberflächen aus CT-Daten entwickelt, welches es ermöglicht, regionsabhängig und an die jeweilige Mess- oder Prüfaufgabe angepasst Grenzflächen zu ermitteln. Ziel ist es, dass der Anwender nach Eingabe der für seine Messaufgabe relevanten Anforderungen direkt das passende Oberflächenmodell erhält. Sowohl Vor- als auch Nachbearbeitungsschritte werden hierbei überflüssig. Die Anzahl der Eingabeparameter soll gering und benutzerfreundlich gehalten und, wenn möglich, automatisiert werden. Dieses Verfahren zur kontrollierten, aufgabenangepassten Oberflächenextraktion aus volumetrischen CT-Daten bietet die Möglichkeit zur Lösung einer Vielzahl von messtechnischen Problemstellungen für verschiedene Bauteiltypen und stellt sich damit aktuellen und zukünftigen Herausforderungen an die industrielle CT-Technologie.



---

## Short summary

The industrial computer tomography (CT) is a modern instrument for quality assurance, which enables the non-destructive and complete inspection of parts. As a result, it provides 3D volume data with all geometrical and material-based structures, which constitute the basis for a variety of applications in quality control. Therefore, the CT is already used today in many stages in the product development process for quality control, but also increasingly for the dimensional measurement of components. In order to perform such measurement applications, it requires the determination of 3D surface data, which describe the material limits of the part. Current standard methods show decisive disadvantages in practice, which is the reason that the CT is nonapplicable for many types of components and tasks or additional processing steps are required to meet specific needs. In this work a novel approach for extraction of 3D surfaces from CT data is developed, which allows the determination of the limiting surface region-dependent and adapted to the measuring or testing task. The aim is that the user gets the appropriate 3D surface model directly to the relevant requirements for his metrological problem. Both pre-and post-processing steps are superfluous here. The number of input parameters are to be kept easy to use and, if possible, automated. This method of controlled, task-adapted surface extraction from volumetric CT data provides the ability to solve a variety of measurement problems for different types of components and thus fulfills current and future challenges of the industrial CT technology.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	2
<b>2 Technische Grundlagen der industriellen Computertomographie</b>	<b>5</b>
2.1 Entstehung der industriellen Computertomographie . . . . .	5
2.2 Funktionsweise der industriellen Computertomographie . . . . .	6
2.2.1 Komponenten und Aufbauvarianten . . . . .	9
2.2.2 Prozesskette der Datengewinnung und -auswertung . . . . .	12
2.3 Einflüsse auf Ergebnisqualität . . . . .	13
2.4 Anwendungsgebiete und typische Aufgabenstellungen . . . . .	15
<b>3 Stand der Technik Oberflächenextraktion aus Voxeldaten</b>	<b>21</b>
3.1 Segmentierungsverfahren und Grenzflächenfindung . . . . .	21
3.1.1 Begriffsklärung Histogramm . . . . .	23
3.1.2 Pixelbasierte Segmentierungsverfahren . . . . .	23
3.1.3 Kantenbasierte Segmentierung . . . . .	24
3.1.4 Regionenbasierte Segmentierung . . . . .	24

3.1.5	Modellbasierte Segmentierung . . . . .	25
3.1.5.1	Hough-Transformation . . . . .	25
3.1.5.2	Statistische und deformierbare Modelle . . . . .	26
3.1.5.3	Aktive Konturen oder Snakes . . . . .	28
3.1.5.4	Level Sets Methode . . . . .	31
3.2	Der Marching Cubes Algorithmus . . . . .	32
3.2.1	Beschreibung des Verfahrens . . . . .	33
3.2.2	Bewertung des Marching Cubes Verfahrens . . . . .	34
3.2.3	Forschungsarbeiten zum Marching Cubes Verfahren . . . . .	39
3.3	Alternative Ansätze zur Oberflächenbestimmung in 3D-Volumendaten	43
3.4	Zusammenfassung und Vorstellung des bestehenden Bedarfs . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Konzeption einer aufgabenbasierten Oberflächenextraktion</b>	<b>51</b>
4.1	Anforderungsanalyse an ein geeignetes Verfahren . . . . .	51
4.1.1	Ausgangslage . . . . .	52
4.1.2	Anforderungen . . . . .	53
4.1.3	Fazit für geeignetes Verfahrenskonzept . . . . .	54
4.2	Entwurf des Gesamtablaufs . . . . .	57
4.3	Erzeugung der Initialoberfläche . . . . .	60
4.3.1	Manuelle Bereichsfestlegung . . . . .	61
4.3.2	Grauwertbasierte Bereichsfestlegung . . . . .	61
4.3.3	Krümmungsbasierte Bereichsfestlegung . . . . .	62
4.3.4	Modellbasierte Bereichsfestlegung . . . . .	63
4.3.5	Transformation der Koordinatensysteme . . . . .	65
4.3.6	Diskretisierung und Überführung in die Initialoberfläche . . . . .	66
4.3.7	Ableitung der geeigneten Initialisierungsmethode . . . . .	68
4.4	Einbringung von übergeordnetem Vorwissen . . . . .	69
4.4.1	Bedingungen an das Vorwissen . . . . .	69
4.4.2	Grauwert- und Gradienteninformationen . . . . .	69

4.4.3	Krümmungsinformationen . . . . .	73
4.4.4	Weitere Varianten von Vorwissen . . . . .	77
4.5	Aufstellen der Energiefunktionen . . . . .	79
4.5.1	Erläuterung zu Energiefunktionen . . . . .	79
4.5.2	Grauwertbasierte Energiefunktionen . . . . .	80
4.5.3	Krümmungsbasierte Energiefunktion . . . . .	84
4.5.4	Aufstellen der Gesamtenergiefunktion . . . . .	87
4.6	Positionsvariation und Suchbereiche . . . . .	88
4.6.1	Wahl der Form des Suchbereichs . . . . .	88
4.6.2	Positionsvariation . . . . .	90
4.6.3	Topologische Variationsmöglichkeiten . . . . .	93
4.7	Möglichkeiten der Interpolation . . . . .	93
4.7.1	Anwendung im Grauwertprofil . . . . .	93
4.7.2	Lineare Interpolation . . . . .	95
4.7.3	Logarithmische Interpolation . . . . .	96
4.7.4	Kubische Hermite-Interpolation . . . . .	96
4.7.5	Bewertung der Interpolationsmöglichkeiten . . . . .	98
4.8	Energieminimierung . . . . .	99
4.9	Zusammenfassung . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Umsetzung einer aufgabenangepassten Oberflächengenerierung</b>	<b>103</b>
5.1	Gesamtablauf . . . . .	103
5.1.1	Rahmenbedingungen . . . . .	103
5.1.2	Ablaufdefinition . . . . .	104
5.1.3	Aufgabenabläufe . . . . .	107
5.2	Bereichsabhängige Initialisierung . . . . .	107
5.2.1	Modellbestimmung und Auswahl . . . . .	107
5.2.2	Eingabeparameter und Triangulation . . . . .	109
5.2.3	Zusammenfassung der Bereichsauswahl . . . . .	110

5.3	Grauwertprofilauflistung und -analyse . . . . .	111
5.4	Umsetzung der Energiefunktionen . . . . .	112
5.4.1	Nutzereingaben . . . . .	112
5.4.2	Funktionsweise von $E_{Vox}$ . . . . .	113
5.4.3	Funktionsweise von $E_{Curv}$ . . . . .	117
5.4.4	Kombination der Teilenergien und Gesamtenergieminimierung	120
5.5	Umsetzung der Subvoxelsuche . . . . .	121
5.6	Zusammenfassung . . . . .	124
<b>6</b>	<b>Auswertung und Evaluation</b>	<b>125</b>
6.1	Festlegungen für die Bewertung des Verfahrens . . . . .	125
6.1.1	Erläuterungen und Festlegungen zur Evaluation . . . . .	126
6.1.2	Testkörper und Referenzverfahren . . . . .	129
6.1.3	Versuchsplan . . . . .	132
6.1.3.1	Versuche mit idealer Kugel (A) . . . . .	132
6.1.3.2	Versuche mit Glaskugeln (B) . . . . .	133
6.1.3.3	Versuche mit Glaskugel mit zweitem Material (C) . .	134
6.1.3.4	Versuche mit Aluminiumbauteil (D) . . . . .	135
6.2	Ergebnisqualität im Vergleich . . . . .	136
6.2.1	Ergebnisse für die ideale Kugel (A) . . . . .	136
6.2.2	Ergebnisse für die Glaskugeln (B) . . . . .	138
6.2.3	Ergebnisse für die Multimaterialkugel (C) . . . . .	142
6.2.4	Ergebnisse für das Aluminiumbauteil (D) . . . . .	145
6.3	Typische Aufgabenstellungen und Beispielabläufe . . . . .	148
6.3.1	Materialbasierte Segmentierung . . . . .	150
6.3.2	Geometriebasierte Segmentierung . . . . .	152
6.3.3	Extraktion beliebiger Bereiche . . . . .	157
6.4	Bewertung und Interpretation der Ergebnisse . . . . .	158
6.5	Zusammenfassung der Bewertung und Fazit . . . . .	163

<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>165</b>
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>171</b>
	<b>Literatur</b>	<b>175</b>
<b>A</b>	<b>Eingabeparameter der Implementierung</b>	<b>189</b>
<b>B</b>	<b>Verwendete Datenstrukturen Oberfläche</b>	<b>191</b>



---

# Abkürzungsverzeichnis

ASCII .....	American Standard Code for Information Interchange
ASM .....	Active Shape Models
BAM .....	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
CAD .....	Computer Aided Design
CFK .....	Carbon-faserverstärkter Kunststoff
CT .....	Computertomographie
FDD .....	Focus-Detector-Distance
FEM .....	Finite Elemente Methode
GVF .....	Gradient Vector Flow
GW .....	Grauwert
IPA .....	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
MACET .....	Marching Cubes uses Edge Transformation
MC .....	Marching Cubes Algorithmus
MPE .....	Maximum Permissible Error
MRT .....	Magnetresonanztomographie
PDM .....	Point Distribution Models
PF .....	Probing Error of Form
PS .....	Probing Error of Size
RMS .....	Root Mean Square
ROI .....	Region of Interest
STL .....	Surface Tessellation Language
VDE .....	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDI .....	Verein Deutscher Ingenieure e.V.



---

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau eines medizinischen CT Systems . . . . .	7
2.2	Beispiele für Intensitätsverläufe monochromatischer Strahlung . . . . .	7
2.3	Aufbau eines industriellen CT Systems . . . . .	8
2.4	Ergebnisdaten der CT-Aufnahme eines Steckers . . . . .	9
2.5	ROI-CT: Schnittbilder eines Bandscheibenimplantats . . . . .	12
2.6	Prozesskette der Datengewinnung und -auswertung der CT . . . . .	13
2.7	Artefaktbehaftete Volumenmodelle (Schnittbilder) . . . . .	14
2.8	Anwendungsbeispiele für CT-Datenauswertung . . . . .	17
2.9	Vielfältige CT-Datenauswertung am Beispiel Stufenzylinder . . . . .	17
2.10	eines Greifers aus Kunststoff und segmentierte innere Struktur . . . . .	18
3.1	Histogramme von CT-Volumendaten . . . . .	23
3.2	Beispielsegmentierung mit PDM und ASM . . . . .	27
3.3	Beispiel für Konturfindung mit Snakes . . . . .	29
3.4	Neuberechnung der Knotenpunkte der T-Snakes . . . . .	30
3.5	Topologische Transformationen der T-Snakes . . . . .	31
3.6	Level Set Beschreibung einer Kurve . . . . .	32
3.7	Konturfindung nach Level Set Methode . . . . .	33
3.8	Fallunterscheidung der Triangulierung des Marching Cubes Algorithmus	34
3.9	Uneindeutigkeiten des Marching Cubes Algorithmus . . . . .	35
3.10	Versuch der Materialunterscheidung mit MC . . . . .	36
3.11	STL der Kuppe einer Dieseleinspritzdüse mit MC . . . . .	37

3.12	MC-Beispiel eines Bauteils aus Aluminium und Stahl . . . . .	38
3.13	MC-Beispiel eines Bauteils aus Kunststoff mit Metallstiften . . . . .	38
3.14	Test zur Auflösung von Uneindeutigkeiten nach [Che95] . . . . .	39
3.15	Netzvariationen nach MACET . . . . .	41
3.16	Beispiel für das Otsu-Verfahren . . . . .	41
3.17	Verbesserte Oberflächenfindung nach [Ble08] . . . . .	42
3.18	Vergleich MC und Afront-Technik . . . . .	45
3.19	Multimaterialanalyse nach [HSOS10] . . . . .	47
3.20	Vollständige Oberfläche mit getrennten Materialien nach [HSOS10] .	48
4.1	Ablaufdiagramm der aufgabenbasierten Oberflächenextraktion . . . . .	58
4.2	Beispiele für manuelle ROI-Eingabe . . . . .	61
4.3	Krümmungsbasierte Bereichsfestlegung . . . . .	62
4.4	Modellbasierte Bereichsfestlegung . . . . .	63
4.5	Bestimmung von Regelgeometrien . . . . .	64
4.6	Ermittelte Regelgeometrien aus Krümmungsbereichen . . . . .	64
4.7	Koordinatensystemtransformation für CAD- und CT-Daten . . . . .	65
4.8	Unterschiedliche Triangulierungen eines CAD-Modells . . . . .	67
4.9	Multimaterialbauteil und dazugehöriges CAD-Modell . . . . .	68
4.10	Stufenzylinder aus Kunststoff und CT-Schnitt . . . . .	70
4.11	Grauwertverläufe des Stufenzylinders . . . . .	70
4.12	Materialgrenzen nach größtem Gradienten . . . . .	71
4.13	Elliptische, hyperbolische und parabolische Punkte auf Torus . . . . .	74
4.14	Netzpunkt mit Dreiecks Umgebung . . . . .	75
4.15	CT-Schnitt von CFK-Bauteil mit sichtbarer Textur . . . . .	78
4.16	Beispiel für Spaltanalyse . . . . .	79
4.17	Automatische Klassifikation der Fälle der Grauwertübergänge . . . . .	81
4.18	Grauwertübergang mit festem gesuchten Gradienten . . . . .	82
4.19	Beispiel für Profilrichtungen . . . . .	89

4.20	Bresenham Algorithmus für eine Linie im 2D Pixelraster . . . . .	89
4.21	Vergleich der Grauwertprofile: Bresenham und Interpolation . . . . .	90
4.22	Zum Grauwertprofil zugehörige Längen . . . . .	91
4.23	Abschätzungen der Wandstärken basierend Normalenrichtung . . . . .	92
4.24	Resultierendes Grauwertprofil (voxelgenau) . . . . .	94
4.25	Verschiedene Unterteilungen des Grauwertprofils . . . . .	95
4.26	Prinzip der kubischen Hermite-Interpolation . . . . .	97
4.27	Verlauf des Grauwertprofils kubisch hermit-interpoliert . . . . .	98
5.1	Detailliertes Ablaufdiagramm der Implementierung zur aufgabenba- sierten Oberflächenextraktion . . . . .	106
5.2	Überführung von Punktwolken in Geometriemodell . . . . .	108
5.3	Triangulation des CAD-Modells einer Kugel mit unterschiedlichen Pa- rametern . . . . .	109
5.4	Vorgehen der Initialisierung mit und ohne gegebenem CAD-Modell .	110
5.5	Energieminimierung mit $E_{Grad}$ mit unterschiedlicher Initialisierung .	114
5.6	Ergebnis der Energieminimierung bei schlechter Initialisierung mit zu kleinem Suchbereich bzw. Profilgröße . . . . .	114
5.7	Ergebnis der Energieminimierung mit $E_{Grad}$ für den inneren und den äußeren Zylinder . . . . .	115
5.8	Ergebnisse der Minimierung der Grauwertenergie für Material rechts und links der Initialoberfläche . . . . .	115
5.9	Grauwertprofil im Lückenbereich . . . . .	116
5.10	Vergleich des Ergebnisses der Energieminimierung und MC . . . . .	116
5.11	Ergebnisoberflächen nach Iterationsschritten mithilfe krümmungsba- sierter Energieminimierung . . . . .	117
5.12	Ergebnis der reinen minimalen Krümmungssuche . . . . .	118
5.13	Energieminimierung nach $E_{Flach}$ und $E_{KWnom}$ mit Sollwerten . . . . .	119
5.14	Verhalten einer Ebene bei Minimierung mit zylindrischer Sollform . .	119
5.15	Beispielergbnisnetze für verschiedene Gewichtungen . . . . .	121
5.16	Gefundene Grenzfläche vor und nach Subvoxelunterteilung . . . . .	122

---

5.17	Unterschiedliche Ableitungsdefinition für Grauwertprofilinterpolation	123
6.1	Genutztes Messsystem	128
6.2	Testobjekte zur Genauigkeitsevaluation	130
6.3	25 mm Kalibrierkugel mit flexiblem Kunststoff ummantelt (Voxelschnittbild)	135
6.4	Tasterpunktwolke des Aluminiumbauteils	135
6.5	Soll-Ist-Vergleich zum CAD-Modell der perfekten Kugel mit MC-Netz und mit Ergebnisnetz	137
6.6	Soll-Ist-Vergleich zwischen MC-Daten und Ergebnisnetz (A)b aus V1	138
6.7	Soll-Ist-Vergleich zwischen MC-Daten und Ergebnisnetzen (A)b V2 und V3 vor und nach der Subvoxelunterteilung	139
6.8	Soll-Ist Vergleich des Ergebnisnetzes von V2 b zum Marching Cubes Netz ohne und mit Berücksichtigung der Krümmungsenergie	140
6.9	Vergleich der unterschiedlichen Gewichtung	143
6.10	Vergleich der unterschiedlichen Grauwertenergien	144
6.11	Ergebnisse des Marching Cubes Verfahrens für die Multimaterialkugel	145
6.12	Vergleich der Ergebnisnetze zum Sollmodell für die Glaskugel mit zweitem Material	146
6.13	Schnittbilder durch das Voxelmodell des Aluminiumbauteils	147
6.14	Abweichungsdarstellung beider Zylinder zum eingepassten Element für $E_{Thresh}$ (links) und der Ebenen für $E_{Grad}$ (rechts)	149
6.15	Reduzierte Punkt wolke des MC Ergebnisnetzes mit eingepassten Regelgeometrien	149
6.16	Vergleich der Abläufe für die Bestimmung der inneren Berührungsfläche des Multimaterial-Zylinders	151
6.17	Vergleich der Berührungsfläche des Multimaterial-Zylinders	152
6.18	Ergebnisoberflächen für unterschiedliche Materialien des Zylinderbauteils	153
6.19	Kunststoffstecker und Schnitte durch das dazugehörige Voxelmodell	153
6.20	Zylindrische Innenflächen des Kunststoffsteckers mit Abweichungsdarstellung zur Sollform	154

---

6.21 STL-Daten des Kunststoffsteckers aus MC Verfahren und Vergrößerung mit Blick ins Innere . . . . .	154
6.22 Ebene Innenflächen des Kunststoffsteckers mit Abweichungsdarstellung zur Sollform . . . . .	155
6.23 Ergebnisse für Aufgabenstellungen des Kunststoffsteckers . . . . .	155
6.24 Aufgeschnittene STL-Daten aus MC Verfahren mit inneren Oberflächen durch Lunker im CT-Datensatz . . . . .	156
6.25 Zwei-Finger-Greifers mit Funktionsprinzip Faltenbalg und Voxelschnitt	157
6.26 Soll-Ist-Vergleich der CAD- und MC-Daten und überlagerte Ebenenprojektion des Greifers . . . . .	158
6.27 Bestimmung der Fingerflächen des Greifers nach verschiedener Belastung . . . . .	159



---

# Tabellenverzeichnis

4.1	Anforderungsanalyse für bekannte Segmentierungsansätze . . . . .	56
4.2	Eindimensionale Fälle für Grauwertverläufe . . . . .	72
4.3	Fälle für Krümmungsanforderungen und notwendige Informationen . . . . .	77
4.4	Festlegung der grauwertbasierten Energiefunktionen . . . . .	84
4.5	Festlegung der krümmungsbasierten Energiefunktionen . . . . .	87
6.1	Kennwerte des TomoSope <sup>®</sup> HV 500 der Fa. Werth Messtechnik . . . . .	128
6.2	Testkörper und Informationen zu dazugehörigen Datensätzen zur Genauigkeitsevaluation . . . . .	131
6.3	Initialisierungen für ideale Kugel, Maßangaben in <i>mm</i> . . . . .	132
6.4	Initialisierungen für Glaskugeln, Maßangaben in <i>mm</i> . . . . .	133
6.5	Gewichtungen der Energiekomponenten in den durchgeführten Versuchen . . . . .	134
6.6	Initialisierungen für die zu untersuchenden Geometrien des Aluminiumbauteils, Maßangaben in <i>mm</i> . . . . .	136
6.7	Datenauswertung für ideale Kugel . . . . .	137
6.8	Datenauswertung Glaskugel für Stufe 100L . . . . .	141
6.9	Datenauswertung der Glaskugel für Stufe 50L . . . . .	142
6.10	Datenauswertung der Glasgugel für Stufe 16L . . . . .	142
6.11	Datenauswertung für 25 mm Glaskugel mit zweitem Material, alle Angaben in <i>mm</i> . . . . .	145
6.12	Datenauswertung des kleinen Zylinders des Aluminiumbauteils . . . . .	147
6.13	Datenauswertung des großen Zylinders des Aluminiumbauteils . . . . .	148
6.14	Datenauswertung der Distanz der ermittelten Ebenen . . . . .	148



---

# 1. Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Mit der industriellen Computertomographie (CT) steht der modernen Qualitätssicherung ein Instrument zur Verfügung, das die zerstörungsfreie und vollständige Erfassung von Bauteilen ermöglicht. Als Ergebnis liefert sie 3D-Daten mit allen geometrischen und materialbezogenen Strukturen, welche die Basis für verschiedenste Anwendungsbereiche der Qualitätskontrolle darstellen. Deshalb wird die CT heutzutage bereits an vielen Stellen im Produktentstehungsprozess zur Qualitätsprüfung eingesetzt.

In den letzten Jahren hat sich die industrielle Computertomographie nicht nur als Technologie zur zerstörungsfreien Materialprüfung, sondern insbesondere zur vollständigen dreidimensionalen Messung von Bauteilen etabliert. Durch den steigenden Bekanntheitsgrad der CT und ihrer Möglichkeiten, werden die Anzahl, Vielfalt und Komplexität der Aufgabenstellungen und Anfragen aus der Industrie immer größer. Dieser Herausforderung gilt es sich mit neuen Lösungen zu stellen. Um messtechnische Auswertungen durchführen zu können, müssen in den bei der CT entstehenden Volumendaten 3D-Oberflächen, d.h. die Grenzflächen zwischen Materialien, ermittelt werden. Die Extraktion solcher Oberflächendaten erfolgt nach dem aktuellen Stand der Technik unter Verwendung von globalen oder lokalen Schwellwertverfahren, die den Übergang von Bauteil zu Luft definieren. Das üblicherweise verwendete Verfahren ist der Marching Cubes Algorithmus. Dabei handelt es sich um ein globales Schwellwertverfahren, welches jeweils die Grenze zwischen benachbarten Voxeln oder Zellen interpoliert. Bei einem Voxel handelt es sich um das kleinste volumetrische Element im digitalen CT-Volumenmodell, analog zum Pixel im 2D. In der Praxis wird dieses Vorgehen zur Verbesserung der Datenqualität häufig mit

zusätzlichen Verarbeitungsschritten kombiniert, beispielsweise mit Filterungen oder lokal adaptiver Schwellwertanpassung.

Diese Verfahren weisen in der Praxis jedoch entscheidende Nachteile auf. Zum einen kann in der Realität der optimale Schwellwert für dasselbe Material innerhalb eines Volumens, z.B. aufgrund verschiedener Wandstärken, variieren. Zum anderen können weitere vorhandene Materialien im Objekt ignoriert werden oder Röntgenstrahlungsartefakte der CT fälschlicherweise als zur Oberfläche zugehörig angesehen werden. Zudem erzeugen die Schwellwertverfahren ein gleichmäßig dichtes Dreiecksnetz entsprechend der Auflösung der Aufnahmetechnologie. Dadurch entstehen viele unnötige Punkte und enorm große Datensätze, die sich schlecht oder gar nicht zur Weiterverarbeitung in gängiger Messsoftware oder CAD-Programmen eignen. Der Nutzer hat bei der Oberflächenerzeugung keine Möglichkeit, die Punkteverteilung und -anzahl zu kontrollieren. Oft ist eine Reduktion der Dreiecksanzahl nötig, was zum Verlust von Informationen in Bereichen führen kann, welche für die spätere Messung relevant sind. Des Weiteren ist es mit den bestehenden Verfahren nicht möglich, unterschiedliche Materialien, d.h. Bereiche mit verschiedenen Grauwerten, in einem Dreiecksnetz zu trennen und separat zu erfassen. Zusammengefasst lassen sich folgende Defizite der bisher verwendeten Verfahren zur Oberflächenbestimmung aus CT-Daten als entscheidende Nachteile identifizieren:

- Keine Möglichkeit zur direkten Trennung verschiedener Materialien,
- Keine Festlegung bestimmter Bereiche möglich (Nachbearbeitung in Form von Netzbeschnidung notwendig),
- Keine Kontrolle über erzeugte Datenmengen gegeben (Nachbearbeitung in Form von Datenreduktion notwendig),
- Keine aufgabenangepasste bzw. bereichsabhängige Auflösung der Ergebnisflächen definierbar.

Aus diesen Gründen ist die CT als Messverfahren für viele Bauteiltypen und Mess- und Prüfaufgabenstellungen bislang nicht anwendbar oder bedarf einer Vielzahl an zusätzlicher Nachbearbeitungsschritten, um speziellen Anforderungen gerecht zu werden, obwohl die gesuchte Information grundsätzlich vorhanden ist.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Extraktion von Oberflächen aus CT-Daten entwickelt, welches es ermöglicht, regionsabhängig und damit an die jeweilige Mess-

oder Prüfaufgabe angepasste Grenzflächen zu ermitteln. Ziel ist es, dass der Anwender nach Eingabe der für seine Messaufgabe relevanten Anforderungen direkt das passende Oberflächenmodell erhält. Sowohl Vor- als auch Nachbearbeitungsschritte werden hierbei überflüssig. Die Anzahl der Eingabeparameter soll gering und benutzerfreundlich gehalten und, wenn möglich, automatisiert werden. Beispiele hierfür sind gewünschte Detailgenauigkeit, Punktdichte, Material-, Geometriebereiche oder bestimmte Krümmungsflächen. Es werden eine einfache manuelle Selektion interessanter Bereiche und eine intuitive Nutzerinteraktion garantiert. Folgende Merkmale und Vorteile gegenüber dem herkömmlichen Vorgehen werden erwartet und stehen im Fokus der Entwicklungsarbeiten:

- Der Anwender hat die Kontrolle über die erzeugte Datenmenge, d.h. beliebig fein unterteilbare Dreiecksnetze können erzeugt werden.
- Es besteht die Möglichkeit der Festlegung und Parametrierung verschiedener Bereiche eines Bauteils, d.h. das Dreiecksnetz ist bereichsabhängig unterteilbar.
- Eine lokale Segmentierung bezüglich der Anforderungen einer Problemstellung ist definierbar, beispielsweise bezüglich Schwellwerten, Geometrien oder Krümmungsbereichen.
- Verschiedene Materialien innerhalb eines Bauteils sind voneinander trennbar.
- Entferntes Rauschen, d.h. nicht zum Objekt gehörige Teile, werden ignoriert.
- Es sind keine Vorverarbeitungsschritte nötig, z.B. Filterung.
- Es sind keine Nachbearbeitungsschritte nötig, z.B. Datenreduktion, manuelles Beschneiden.

Zusammengefasst soll ein neuartiges Vorgehen zur aufgabenangepassten, kontrollierten Oberflächenextraktion entstehen, welches dem Anwender die für seine Anforderungen optimalen 3D-Daten direkt aus dem aufgenommenen CT-Volumenmodell erzeugt. Hierzu werden in Kapitel 2 zunächst die technischen Grundlagen der industriellen Computertomographie erläutert, um die Rahmenbedingungen der Problemstellung darzulegen. Zur Realisierung des Verfahrens werden darüber hinaus in Kapitel 3 bekannte Methoden der 2D- und 3D-Datenverarbeitung analysiert und auf ihre Eignung untersucht. Außerdem wird der bisher zumeist verwendete Marching Cubes Algorithmus sowohl in seiner klassischen als auch in erweiterter, verbesserter Form näher beleuchtet. Schließlich erfolgt ein allgemeiner Überblick über aktuelle Forschungsarbeiten zum Thema Oberflächenextraktion aus Volumendaten und die

Ableitung des bestehenden Bedarfs. Diese Ergebnisse dienen im Kapitel 4 als Basis für die Konzeption eines neuen Ansatzes zur Überwindung der ermittelten Defizite. Hierfür wird ein geeigneter Ablauf entwickelt und schließlich alle notwendigen Schritte ausführlich mit Blick auf eine praktische Umsetzung erarbeitet. Das beinhaltet die Identifikation aller relevanten Parameter für einen ausreichenden Einfluss des Anwenders auf die gesuchte Oberfläche, ohne die Benutzerfreundlichkeit zu vernachlässigen. Als Resultat stehen alle notwendigen Erkenntnisse für eine vollständige Implementierung zur Verfügung, welche in Kapitel 5 präsentiert wird. Diese praktische Umsetzung dient schließlich zur ausführlichen Evaluation des Verfahrens in Kapitel 6. Dazu werden Testobjekte und Bauteile ausgewählt, um zum einen die Leistungsfähigkeit des neuen Vorgehens bezüglich erreichbarer Toleranzen zu bewerten. Zum anderen werden die vielfältigen Anwendungsfelder und Aufgaben verdeutlicht, die ein neuartiges, aufgabenangepasstes Verfahren eröffnet.

---

## **2. Technische Grundlagen der industriellen Computertomographie**

In diesem Kapitel sollen sowohl auf die prinzipielle Funktionsweise und den Stand der Technik von Röntgensystemen eingegangen als auch die verschiedenen Einflüsse auf die Qualität der Ergebnisse und der daraus resultierenden Möglichkeiten und Einschränkungen der Technologie vorgestellt werden. Dies dient dem Überblick über die der vorliegenden Arbeit zugrundeliegende Problemstellung bezüglich der aktuell typischen Aufgabenstellungen der Industrie und die Herausforderungen an die Oberflächenerzeugung aus CT-Daten.

### **2.1 Entstehung der industriellen Computertomographie**

Mit der Erfindung der Computertomographie steht bereits seit 1972 ein mächtiges Instrument zur vollständigen 3D-Digitalisierung zur Verfügung, das schnell und mit großem Erfolg in der Humanmedizin Einzug hielt. Aber auch das Potential für die zerstörungsfreie Erfassung von Bauteilen wurde bereits früh erkannt. Während für diesen Zweck zunächst medizinische Anlagen genutzt wurden, folgte bald die Entwicklung spezieller Aufbauten, welche an die industrielle Anwendung angepasst waren. Bereits 1978 startete die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin mit der Entwicklung eines Computertomographen für die rein industrielle Anwendung, dessen Fertigstellung fünf Jahre dauerte [RG83] und [HGRK85]. Anfang der 1990er Jahre gewann der Einsatz der Computertomographie

für die Untersuchung von Bauteilen zunehmend an Bedeutung. Zunächst handelte es sich bei industriellen CT-Systemen vor allem um Geräte zur Inspektion des Bauteilinneren, also zur Detektion von Lunkern, sonstigen Materialfehlern oder zur Prüfung der Anwesenheit bestimmter Merkmale. Die ersten Geräte eigneten sich aufgrund der zu geringen Genauigkeit jedoch nicht für die zuverlässige Ermittlung von Maßen. Erst Anfang des neuen Jahrtausends wurde der Einsatz der CT in der Koordinatenmesstechnik ermöglicht. Dies gelang durch Übertragung von Technologien aus bestehenden Koordinatenmessgeräten, vor allem bezüglich der mechanischen Präzision, und durch Weiterentwicklungen der Einzelkomponenten [CN11]. Die moderne Computertomographie ermöglicht die vollständige, zerstörungsfreie und präzise Digitalisierung von verschiedensten Bauteiltypen und bietet damit ein breites Anwendungsspektrum für eine Vielzahl von Aufgaben der Mess- und Prüftechnik. Diese entscheidenden Vorteile gegenüber bestehender Messtechnik führte dazu, dass sich die Computertomographie bis heute zunehmend in industriellen Anwendungsbereichen etabliert hat.

## 2.2 Funktionsweise der industriellen Computertomographie

Das Grundprinzip der CT basiert auf der Nutzung von Röntgenstrahlung. Analog zur medizinischen CT besteht ein industrielles Röntgen-CT-System prinzipiell aus einer Röntgenquelle und einer Aufnahmeeinheit, einem sogenannten Röntgendetektor, zwischen welchen das zu untersuchende Objekt eingebracht werden kann. Der Aufbau und die Anforderungen unterscheiden sich jedoch deutlich. Während in der Medizintechnik die Röntgenstrahlenemissions- und die Strahlenaufnahmeeinheit gegenüberliegend um den Patienten gedreht werden (siehe Abbildung 2.1), sind diese bei der industriellen CT fest und das Objekt selbst rotiert um eine definierte Drehachse.

Mit Hilfe einer Manipulationseinheit, zumeist ein fahrbarer Drehteller, der zwischen Quelle und Detektor positioniert ist, können Bauteile in den Strahlengang eingebracht werden. Hierbei wird die Röntgenstrahlung von verschiedenen Materialtypen und -dicken unterschiedlich stark abgeschwächt. Bei der Durchdringung der Röntgenstrahlung von Materie wird diese exponentiell geschwächt, nimmt also in ihrer Intensität  $I$  exponentiell zur Dicke  $d$  des Materials ab. Dies wird allgemein für monochromatische Strahlung beschrieben durch

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d},$$

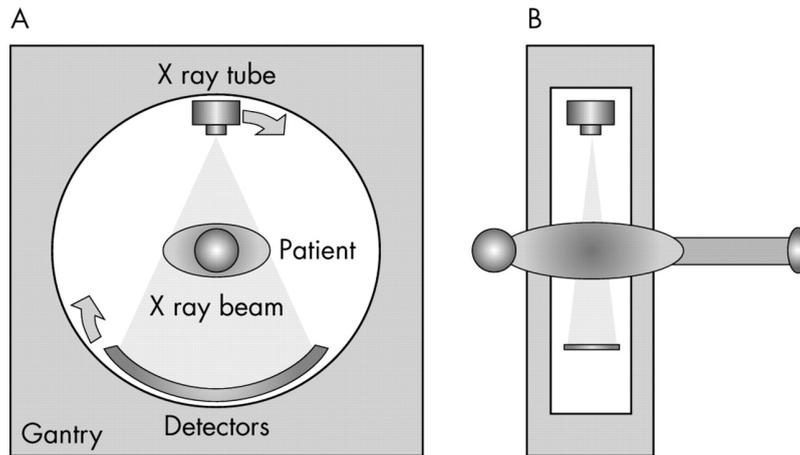


Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau eines frühen CT Systems zur medizinischen Anwendung (Frontansicht(A) und Seitenansicht(B)) [Mol05]

wobei es sich bei  $\mu$  um den Schwächungskoeffizienten des Materials und bei  $I_0$  um die Ausgangsintensität handelt. Die Schwächung  $P$  wird folglich durch den natürlichen Logarithmus beschrieben

$$P = \ln \frac{I_0}{I}$$

In der CT handelt es sich zumeist um polychromatische Röntgenquellen. Hier gilt für die Intensität der Strahlung eine zusätzliche Abhängigkeit zur Energie  $E$

$$I = \int_0^{E_{max}} I_0(E) \cdot e^{-\int_0^d \mu(E) ds} dE$$

In Abbildung 2.2 sind Beispielbilder und die zugehörigen Intensitätsverläufe dargestellt.

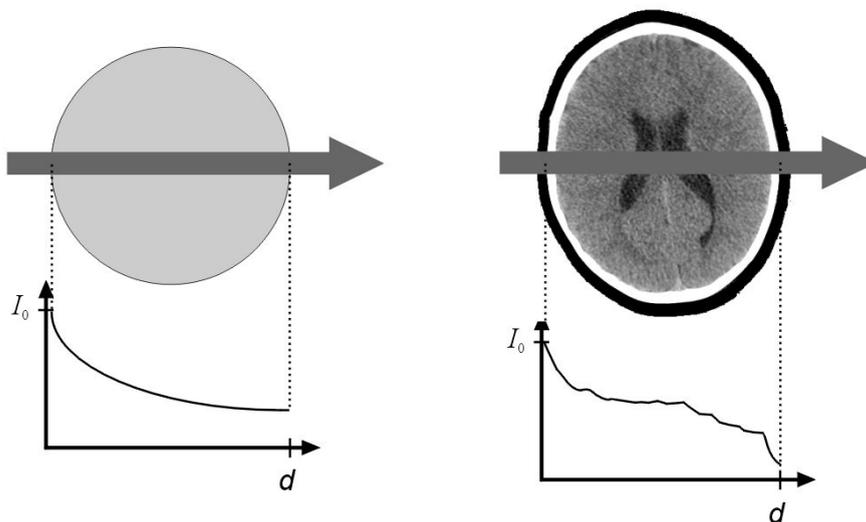


Abbildung 2.2: Verlauf der Intensität bei Abschwächung monochromatischer Strahlung bei homogenem Objekt (links) und polychromatischer Strahlung bei inhomogenem Objekt (rechts) [Kal06]

Der gesamte Aufbau eines typischen industriellen CT-Systems ist in Abbildung 2.3 zu sehen. Das Resultat des Durchstrahlungsvorgangs ist eine Radiographie, also ein

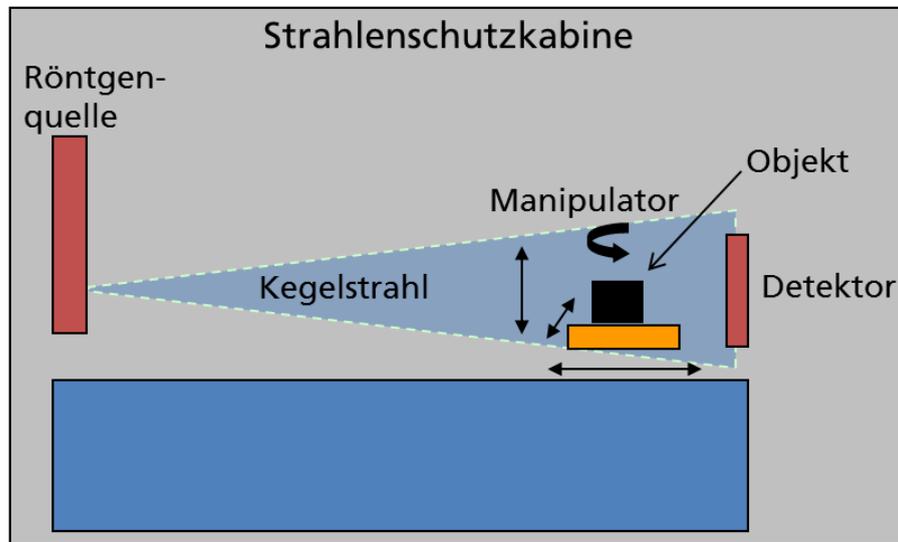


Abbildung 2.3: Prinzipieller Aufbau eines CT-Systems für die industrielle Anwendung

Durchstrahlungsbild des Objekts. Um eine dreidimensionale Darstellung zu erhalten, wird das Objekt in einer für die Abtastung geeigneten Anzahl an Schritten um 360 Grad um eine feste Drehachse rotiert und für jede diskrete Winkelposition ein Durchstrahlungsbild aufgenommen. Mit Hilfe von Rekonstruktionsverfahren, im Grundprinzip durch gefilterte Rückprojektion, ist eine mathematische Ermittlung eines 3D-Modells des Bauteils möglich. Dies ist aus der medizinischen Sicht im Detail nachzulesen bei [Dös99] oder in allgemeiner Form zu finden bei [Kal06]. Das Resultat der 3D-Rekonstruktion liegt schließlich als Volumenmodell vor, eines so genannten Voxelmodells. Bei einem Voxel handelt es sich um das dreidimensionale Äquivalent zu einem Pixel. Der gesamte erfasste Raum mit dem sich darin befindenden Objekt ist hier diskret mit allen äußeren und inneren Strukturen abgebildet. Die Grauwerte variieren entsprechend des Absorptionsgrads des durchstrahlten Materials und stellen dieses idealerweise für jeden Voxel relativ zur Kontrastauflösung und Grauwertverteilung dar. In Abbildung 2.4 sind die Ergebnisdaten einer CT-Aufnahme am Beispiel eines Kunststoffsteckers zu sehen. Dabei handelt es sich links um eine einfache Radiographie, während in der Mitte das vollständige Voxelmodell volumengerendert dargestellt ist. Bei der rechten Ansicht handelt es sich um ein Schnittbild durch das Voxelmodell in welchem deutlich Lunker zu erkennen sind, da diese einen wesentlich geringeren Grauwert ähnlich der Luft aufweisen.

Im Gegensatz zur medizinischen CT liegt der Fokus bei der industriellen Verwendung auf der Optimierung der Genauigkeit und der Steigerung der Auflösung. Der Begriff der Auflösung muss jedoch unterschieden werden, da er in der Literatur teilweise

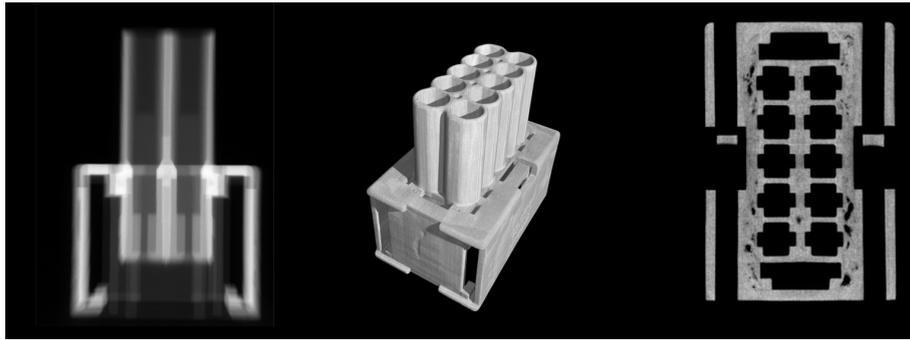


Abbildung 2.4: Ergebnisdaten der CT-Aufnahme eines Steckers (Kunststoffspritzguss): Radiographie (links), Voxelmodell volumengerechert (Mitte), Schnittbild durch das Voxelmodell (rechts)

abweichend verwendet wird. In dieser Arbeit wird vorwiegend von der Strukturauflösung gesprochen, welche stark von den verwendeten Komponenten abhängt und mit der kleinsten erreichbaren Voxelgröße einhergeht. Sie beschreibt, bis zu welcher Größe Objektdetails abgebildet werden können. Davon wird die Ortsauflösung unterschieden. Sie stellt die Auflösung dar, mit welcher der Ort von Objekten, folglich die Position von Materialgrenzen, bestimmt werden kann [CN11].

In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Schritte für die Entstehung von derartigen virtuellen, dreidimensionalen Objektmodellen mit Hilfe der Computertomographie erläutert. Dabei soll der Fokus auf den für die aufgabenabhängige Oberflächenerzeugung relevanten Informationen im Prozess der Datengewinnung liegen. Dazu zählen alle Umgebungs- und Prozessparameter, die einen Einfluss auf die Volumeninformation und deren Qualität haben und bei der aufgabenangepassten Bestimmung von Oberflächen Berücksichtigung finden können bzw. müssen.

### 2.2.1 Komponenten und Aufbauvarianten

Die verschiedenen Bauarten industrieller CT-Systeme zur Gewinnung von 3D-Volumendaten haben einerseits einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Aufnahmeergebnisses und bieten andererseits unterschiedliche Möglichkeiten zur Realisierung verschiedener Aufgabenstellungen. Während in der Medizin heutzutage Spiral-CTs üblich sind, werden im industriellen Bereich hauptsächlich drei Bauvarianten eingesetzt und unterschieden:

a) 2D-CT:

Hier sendet die Strahlenquelle fächerförmig Röntgenstrahlen aus, welche von einem Zeilendetektor aufgenommen werden. Das Objekt wird durch definierte Verschiebung entweder der Aufnahmeeinheit oder des Objekts selbst entlang der Drehachse schichtweise erfasst und rekonstruiert. Die einzelnen Ebenen

können anschließend zu einem Volumen zusammengesetzt werden. Da bei dieser Aufnahmetechnik der Fächerstrahl stets senkrecht zur jeweiligen Schicht steht, kommt es zu wenig Störungen durch Streustrahlung, siehe 2.3, und zu geringen Messabweichungen im Vergleich zur 3D-CT. Darüber hinaus erlaubt die Zeilentechnologie eine hohe Strukturauflösung durch kleinere Dimensionierung der einzelnen (Szintillator-)Einheiten bzw. Pixel. Jedoch führt das separate Scannen von Schichten zu langen Messzeiten und einer schlechten Ausnutzung der Energie der Röntgenquelle [FTM<sup>+</sup>08].

b) 3D-CT:

Bei der 3D-CT hingegen wird die Röntgenstrahlung als Kegelstrahl emittiert und von einem Flächendetektor erfasst. Der Flächendetektor nimmt eine Vielzahl von Zeilen gleichzeitig auf, was eine direkte Rekonstruktion des gesamten Raumes ermöglicht. Sowohl die verkürzte Messzeit, als auch die deutlich verbesserte Energieausnutzung sind entscheidende Vorteile, die die 3D-CT zur meist verwendeten CT-Bauform gemacht haben. Durch die Kegelgeometrie der Röntgenstrahlen kommt es jedoch zu erhöhter Streustrahlung, siehe 2.3, und Prinzip bedingter Verminderung der Datenqualität in den Randbereichen. Je kleiner der Öffnungswinkel des Strahlenkegels, desto geringer die Störungen. Aktuelle Flächendetektoren haben eine maximale Größe von 2048x2048 Pixel und physikalisch bedingt größere Einzelelemente, was sich bezüglich der Strukturauflösung gegenüber der 2D-CT nachteilig auswirkt. Einen Vergleich der Ergebnisse einer 2D- und 3D-CT Aufnahme ist in [FJH10] dargestellt.

c) Helix-CT:

Die Helix-CT ist die neuste Entwicklung bei den industriellen CT-Systemen und gleichzeitig dem Prinzip der medizinischen CT am nächsten. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung der 3D-CT. Das Objekt wird hierbei nicht nur um eine Drehachse rotiert, sondern erfährt gleichzeitig eine Verschiebung entlang dieser Achse. Es wird folglich helixförmig durch das System abgebildet. Die Vorteile dieses Vorgehens sind die Reduktion von sogenannten Kegelstrahlartefakten, siehe 2.3, und die Erfassung nahezu beliebiger Bauteillängen. Um die beiden Bewegungen während der Aufnahme angemessen durchführen zu können, ist jedoch eine präzise und komplexe Mechanik notwendig, welche einen aufwendigen Aufbau mit sich bringt. Näheres ist zu finden bei [KHS10].

Neben den vorgestellten Formen der Gesamtsysteme lassen sich CT-Geräte auch anhand der Anwendungsmöglichkeiten der eingesetzten Röhrentechnologie klassifizieren. Grundsätzlich hängt die erreichbare Strukturauflösung einer CT-Aufnahme von der Brennfleckgröße der Röntgenquelle ab. Dieser Brennfleck vergrößert sich mit

zunehmender Leistung, welche wiederum zur Durchstrahlung unterschiedlicher Bauteilformen und Materialien in unterschiedlicher Größe notwendig ist. Entsprechend verschiedener Aufgabenstellungen wurden hierzu CT-Systeme mit unterschiedlichen Röhrentechnologien entwickelt:

- Makrofokus-CT: Mit bis zu 450kV lassen sich hiermit sehr große Wandstärken und dichte Materialien durchstrahlen. Derartige Anlagen werden vorwiegend für die Digitalisierung von Metallbauteilen, wie Motorblöcken, eingesetzt. Die Detailauflösung liegt aufgrund der hohen Leistungen im Millimeterbereich.
- Mikrofokus-CT: Solche CT-Systeme beinhalten Röntgenröhren mit einer maximalen Spannung von 250kV und ermöglichen eine Strukturauflösung im Mikrometerbereich. Sie eignen sich für ein großes Spektrum an Materialien und erreichen ihre Grenzen bei größeren Wandstärken metallischer Bauteile z.B. bei Aluminium bis zu einigen Zentimetern, bei Stahl bis zu einigen Millimetern.
- Submikrofokus- oder Nanofokus-CT: Dabei handelt es sich um eine auf kleine Strukturauflösungen optimierte Röntgenröhre, kombiniert mit einem geeigneten Detektor. Solche Systeme erreichen Detailerkennbarkeiten bis zu 500 nm und sind aufgrund der entsprechend geringen Leistungen nur für kleine Objektgrößen geeignet (wenige Millimeter). Typische Anwendungsbereiche sind daher Untersuchungen kleiner Proben für die Materialcharakterisierung oder die Inspektion elektronischer Kleinstbauteile.

Ein weiterer Aspekt bei einem CT-System ist der Abstand zwischen Röntgenquelle und Detektor (Focus-Detector-Distance, kurz FDD) bzw. der mögliche Verfahrweg des Objekts im Röntgenstrahl. Dies bestimmt durch die Fächer- oder Kegelgeometrie des Strahls (gemeinsam mit der Detektorgröße und -pixelauflösung) die maximal mögliche Vergrößerung und den maximal erfassbaren Raum. Je näher sich das Objekt an der Quelle befindet desto höher die Vergrößerung und damit die Strukturauflösung, aber umso kleiner ist auch der erfassbare Raum, der die Objektgröße beschränkt. Folglich kann die maximale Auflösung eines CT-Systems nicht für alle Bauteile erreicht werden, sondern nur für solche, welche mit ausreichend geringer Leistung für den kleinsten möglichen Brennfleck der Röntgenquelle durchstrahlt werden können und dabei gleichzeitig in den kleinsten dazugehörigen Raum passen.

Eine Möglichkeit der Vergrößerung des Raums ist das sogenannte Rastern, bei welchem Detektor und Röhre in eine oder beide Bildrichtungen verschoben und die entstehenden Bilder anschließend zusammengesetzt werden. Dies verlängert die Aufnahmezeit und vergrößert den resultierenden Datensatz proportional zur Anzahl der Rasterabschnitte. Als Neuentwicklung zu diesem Thema ist die Region-of-Interest-CT (ROI-CT) oder Ausschnitts-CT zu nennen, auf deren Funktionsweise im Rahmen

dieser Arbeit nicht im Detail eingegangen wird. Näheres ist [MKS10a] zu entnehmen. Sie stellt eine vielversprechende Weiterentwicklung dar, welche es ermöglicht, einzelne interessante und relevante Bereiche eines Bauteils mit einer höheren Strukturauflösung aufzunehmen, als es die Bauteilgröße bei der herkömmlichen CT erlauben würde, siehe Abbildung 2.5.

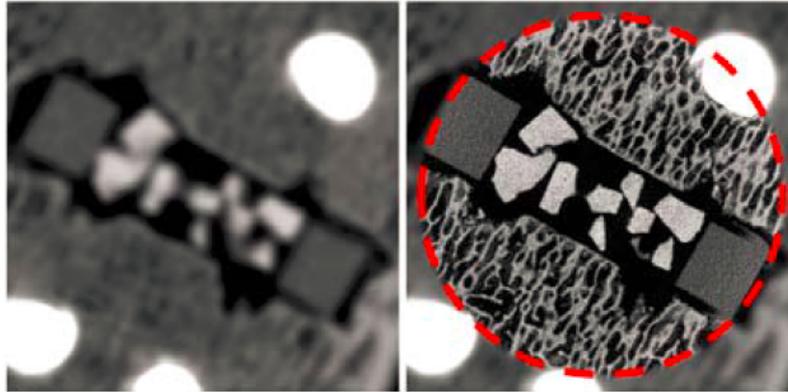


Abbildung 2.5: Schnittbild der CT-Aufnahme eines Bandscheibenimplantats: links der Übersichtsscan und rechts mit erhöhter Auflösung dank ROI-CT [MKS10b]

### 2.2.2 Prozesskette der Datengewinnung und -auswertung

Die vollständige Prozesskette einer Datenaufnahme für eine Prüf- oder Messaufgabe mittels röntgenbasierter Computertomographie beginnt mit der Auswahl des geeigneten zur Verfügung stehenden CT-Systems und der Anpassung aller möglichen Parameter, wie beispielsweise der Vergrößerungsstufe, der Spannung und Stromstärke der Röntgenquelle, um eine optimale Datenqualität zu erhalten. Das direkte Ergebnis einer CT-Aufnahme nach der Rekonstruktion der Projektionen ist, wie oben beschrieben, ein diskretes, volumetrisches 3D-Modell des Objekts. Bereits dieses Voxelmodell liefert ausreichend Informationen für vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Da die Voxel schichtweise vorliegen, erlaubt das Modell eine zweidimensionale Ansicht einzelner Scheiben und somit einen zerstörungsfreien Einblick ins Innere des Objekts. Diese Schichtbilder eignen sich wiederum für Analysen mittels gängiger Bildverarbeitungsverfahren. Spezielle kommerzielle Softwarepakete ermöglichen zudem das Rendern des gesamten Voxelmodells und weiterführende 3D-Analysen wie z.B. das beliebige Legen von virtuellen Schnitten. Als verbreitetes Softwareprodukt ist an dieser Stelle VGStudio der Firma Volume Graphics [Vol] zu nennen. Außerdem lassen sich hierfür OpenSource-Bibliotheken nutzen, wie beispielsweise das auf OpenGL [Rei] basierende Framework in [WE02]. Die Voxeldaten eines Bauteils bilden darüber hinaus die Grundlage für die Ermittlung der Objektoberflächen. Bei den Oberflächen handelt es sich um die Grenzen zwischen verschiedenen Materialien, die für die Durchführung dreidimensionaler messtechnischer Auswertungen notwendig sind. Sie beschreiben sozusagen die „Orte“ oder „Positionen“ des Materials oder

der Materialien, mit deren Hilfe Größen, wie Längen oder Abstände ermittelt werden können. Zur Bestimmung dieser Grenzflächen hat sich, wie auch in der medizinischen CT, der Marching Cubes Algorithmus [LC87] als Standardverfahren etabliert. Die resultierenden Oberflächendaten liegen in der Praxis zumeist als räumliche Dreiecksnetze im STL-Format (Surface Tessellation Language) oder als ASCII-Punktwolken vor. Die Grenzflächenbestimmung ermöglicht darüber hinaus die Verarbeitung der Bauteilinformationen in weiterführenden Arbeitsschritten, z.B. die Verwendung in gängiger CAD- oder Simulationssoftware. In Abbildung 2.6 ist die Prozesskette anhand des Beispiels eines Greifsystems dargestellt. Nach der Datenaufnahme stehen das Voxelmodell und die Schichtbilder zur Verfügung und durch die anschließende Generierung des Oberflächenmodells wird eine messtechnische Weiterverarbeitung und dreidimensionale Datenauswertung ermöglicht. In diesem Beispiel handelt es sich bei der messtechnischen Auswertung (rechts) um einen Soll-Ist-Vergleich zwischen realer und konstruierter Bauteiloberfläche mit farbkodierter Visualisierung der Abweichungen.

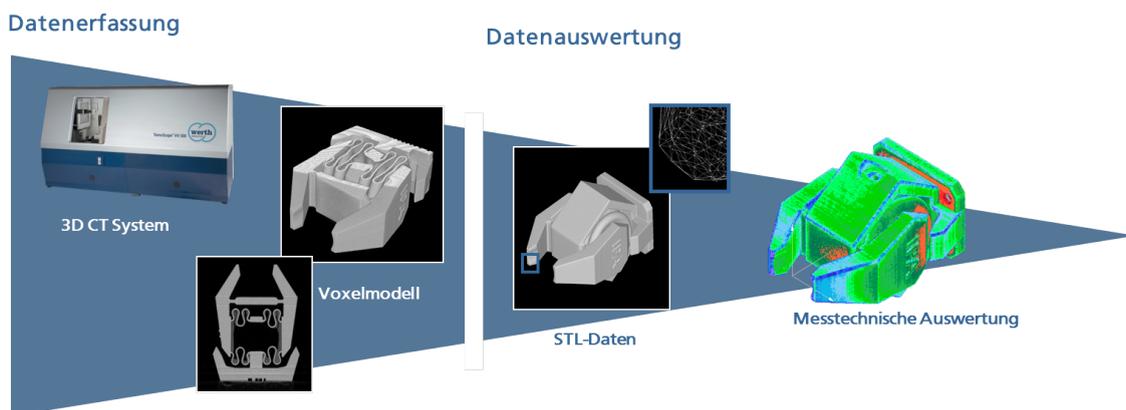


Abbildung 2.6: Prozesskette der Datengewinnung und -auswertung der CT

## 2.3 Einflüsse auf Ergebnisqualität

Während des Ablaufs der beschriebenen Prozesskette gibt es eine Vielzahl von Einflussgrößen mit verschiedenen Auswirkungen auf die Ergebnisqualität. Das Zusammenspiel aller Schritte führt zu komplexen, sich gegenseitig beeinflussenden Effekten. Im November 2010 erschien zu diesem Thema eine eigene VDI/VDE-Richtlinie, die sich mit dem Fokus auf dem dimensionellen Messen mittels CT ausführlich den verschiedenen Aspekten widmet und entsprechende Empfehlungen ausspricht (VDI/VDE 2630, Blatt 1.2, [VDI11]). Diese definiert vier Gruppen, denen die einzelnen Einflussgrößen zugeordnet werden können: CT-Gerät, Anwendung, Auswertung und Bedienung.

Wie bereits teilweise erläutert, haben Aspekte der Hardwarekomponenten, wie die Brennfleckgröße oder Öffnungswinkel, und des Gesamtaufbaus, wie die mechanische Präzision oder Bauform, einen wesentlichen Einfluss auf die Aufnahme und Auflösung. Zur Bestimmung der Messunsicherheit erfolgt üblicherweise eine Kalibrierung des Geräts durch den Hersteller für die verschiedenen Vergrößerungsstufen. Auf diesen Prozess wird in 6.1.1 näher eingegangen. Die bereits erwähnten (Feldkamp- oder) Kegelstrahlartefakte entstehen, wenn die Strahlung nicht orthogonal auf den Detektor trifft und führen zu größeren Messabweichungen mit steigendem Winkeldefizit. Diese lassen sich mit Hilfe rechenintensiver, iterativer Rekonstruktionsverfahren reduzieren [KH09] (z.B. nach Patent Siemens [Nöt09]). Neben den gerätespezifischen Aspekten spielt auch die Art der Anwendung eine entscheidende Rolle. Darunter fallen alle werkstückspezifischen Eigenschaften, wie die Materialien, Geometrie, Lage (bzw. Aufspannung), energieabhängige Wechselwirkungen und entstehende Streustrahlung. Unter der Streustrahlung versteht man allgemein Strahlen, die von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt wurden. Denn es tritt bei der Durchdringung von Materie nicht nur eine Abschwächung, sondern auch eine Streuung der Strahlung auf, was Artefakte in den Ergebnisdaten verursacht. Diese lassen sich teilweise durch einfache Vorfilterung der Röntgenstrahlen verringern, aber ebenso mit Hilfe intelligenter Simulation der Strahlenwege durch ein CAD-Modell berechnen und korrigieren [SGS11], [ESG<sup>+</sup>10] bzw. die optimalen Einstellungen für eine CT-Aufnahme ermitteln [RKF<sup>+</sup>11], [RHS<sup>+</sup>10] (für mehrere Materialien). In Abbildung 2.7 sind zwei Beispiele für artefaktbehaftete Aufnahmen zu sehen.

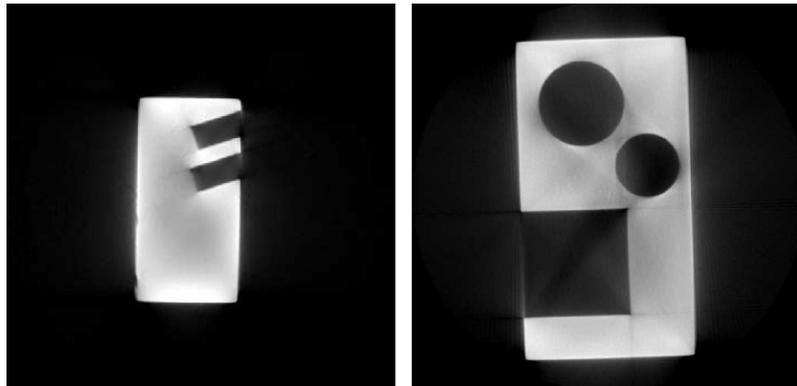


Abbildung 2.7: Schnittbilder durch artefaktbehaftete Volumenmodelle zweier Testbauteile aus [Fra08]

Die sogenannte Strahlauvhärtung ist mit diesem Effekt eng verknüpft. Bei der Materialdurchdringung wird der niederfrequente Anteil der Röntgenstrahlung stärker absorbiert als der hochfrequente, was in Abhängigkeit des Materials und der Materialdicke Auswirkungen auf das Ergebnis hat. Zum einen sind die resultierenden Grauwertintensitäten des Bauteils entsprechend verteilt und zum anderen kommt es bei zu starker Absorption zu Strahlungauvhärtungsartefakten. Auch diese las-

sen sich wesentlich durch Vorfilterung verringern, aber auch mittels Korrekturverfahren numerisch ermitteln und reduzieren. Ebenso ermöglicht die Simulation mit Hilfe von CAD-Modellen eine Korrektur dieser Artefakte. Einen ebenso relevanten Einfluss auf das Ergebnis einer Messaufgabe hat die Art der Datenauswertung und -nachbearbeitung. Hierzu zählen Datenreduktionsschritte, angewandt sowohl auf Voxel- als auch auf Oberflächendaten. Diese sind häufig zur Weiterverarbeitung notwendig, führen aber zu Informationsverlust und -veränderung. Im Allgemeinen fallen unter diese Zuordnung alle softwaretechnischen Verarbeitungsschritte der Prozesskette von den Rekonstruktionsalgorithmen bis hin zu allen anwendbaren Korrekturverfahren (z.B. Tiefpassfilterung der Oberflächendaten) oder Auswertalgorithmen (z.B. Wandstärkenberechnung), welche in Abhängigkeit ihrer Parametrierung zu variierenden Mess- oder Prüfergebnissen führen. Ein entscheidender Schritt für die messtechnische Anwendung ist die Berechnung der Oberfläche selbst. Die Qualität der hier verwendeten Verfahren beeinflusst direkt das Oberflächenmodell und damit alle folgenden Auswertungsschritte. Der dazugehörige Stand der Technik sowie die Probleme der üblicherweise eingesetzten Methoden werden in Kapitel 3 ausführlich behandelt. Außerdem spielen, wie bei anderer Messtechnik auch, die Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, und die Bedienung und Handhabung durch den Menschen eine große Rolle. Speziell bei dieser Technologie gilt, dass sich durch optimale Einstellung aller Parameter eine Vielzahl an Artefakten und Störungen verhindern lässt. Grob zusammengefasst ist bei der Durchführung einer CT-Aufnahme für den Nutzer zu beachten, dass das CT-Gerät für das Objekt geeignet ist, dass die Spannung und der Strom der Röntgenröhre zu Projektionen führen, die bei gutem Kontrast in jedem Winkelschritt alle Bereiche durchstrahlen und dabei nicht überstrahlen, und dass eine angemessene, an die Anforderungen angepasste Vergrößerung und Schrittzahl zur Gewährleistung der ausreichenden Objektabtastung eingestellt ist. Unter Berücksichtigung dieser Merkmale ist eine für das Bauteil optimale Datenqualität erreichbar.

## 2.4 Anwendungsgebiete und typische Aufgabenstellungen

Aufgrund der verschiedenen bestehenden Varianten der CT-Technologie lassen sich Anwendungsgebiete und typische Bauteile kaum einschränken. Edelmetalle und andere sehr dichte Werkstoffe eignen sich aufgrund der schlechten Durchstrahlbarkeit nicht oder nur eingeschränkt für messtechnische CT-Untersuchungen. Oft lassen sich aber einfache Prüfaufgaben, wie die Lunkerdetektion, trotz dieser bestehenden Problematik durchführen, da hierfür die Präzision der Abbildung des Bauteils im Voxelmodell eine untergeordnete Rolle spielt. Für leichtere Metalle und Kunststoffe

verhält sich dies anders. Hier ist eine Vielzahl von Anwendungen möglich, da es sich um für die Röntgentechnik kooperativere Materialien handelt. Typische Branchen, in denen sich der Einsatz der CT als Mess- und Prüfmethode durchgesetzt hat, sind die Kunststoff-, die Metall-, die Automobil- und die Automobilzuliefererindustrie. Die Anwendungsgebiete sind dabei sehr vielseitig und alle in der Prozesskette vorkommenden Datenformen liefern auswertbare Informationen. So eignen sich bereits die Voxeldaten zur Durchführung verschiedener Prüfaufgaben, z.B. zur Detektion von Materialfehlern. Viele Aufgaben benötigen jedoch eine Beschreibung der Materialgrenzen. Dies betrifft vor allem messtechnische Auswertungen. Häufig ist hierbei nicht das gesamte Volumen oder Bauteil von Interesse, sondern es stehen spezielle Fragestellungen im Vordergrund. Typische Aufgaben und Anwendungsgebiete, für welche die CT in den letzten Jahren zunehmend Einsatz findet, sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Erstmusterprüfung,
- volumetrische Defektanalyse, z.B. Lunker,
- Materialcharakterisierung, z.B. Porositätsanalyse,
- Montagekontrolle und Schadensanalyse (Abb. 2.8),
- Bauteildigitalisierung, z.B. für Simulation oder FEM-Analyse,
- 3D-Wandstärkenprüfung und -messung (Abb. 2.8),
- dimensionelles Messen und Formanalyse,
- Soll-Ist-Vergleiche (Abb. 2.9),
- Flächenrückführung (Reverse Engineering) und Rapid Prototyping (Abb. 2.9).

Ein wesentlicher Vorteil der CT-Technologie ist, dass auf Basis desselben Datensatzes prinzipiell alle möglichen Auswertungen zu beliebigen Zeitpunkten durchführbar und wiederholbar sind. Jedoch lassen sich nicht alle Aufgabenstellungen für jedes Objekt mit einer ausreichenden Qualität umsetzen. Häufig sind die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Artefakte und Einflüsse nicht vermeidbar, sodass sich nicht alle Bereiche des Voxelmodells zur Weiterverarbeitung eignen. Beispielsweise ist dies oft bei Bauteilen zu beobachten, die aus mehreren Materialien zusammengesetzt sind. Dies tritt vor allem bei Materialien mit großem Unterschied bezüglich des Schwächungskoeffizienten der Strahlung auf, z.B. Kunststoff und Metall. Hier ist es kaum möglich, beide Materialien ausreichend gut zu erfassen. Zum einen verursacht das dichtere Material Artefakte und zum anderen wird das zweite Material oft zugunsten des anderen überstrahlt und ist im Ergebnisdatensatz nur mit geringem Kontrast abgebildet. Weitere auftretende Probleme sind zu geringe Strukturauflösungen für gewisse Aufgabenanforderungen, vor allem bedingt durch die Bauteilgröße oder Begrenzungen durch das CT-System. Aber auch bei CT-Aufnahmen mit Ergebnissen ausreichend guter Qualität entstehen im Nachgang häufig Probleme. Zur Bearbeitung eines Großteils der

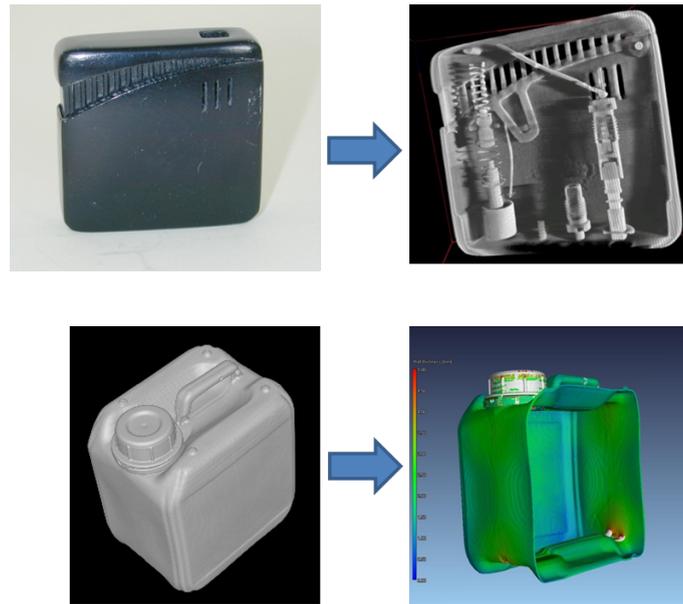


Abbildung 2.8: Anwendungsbeispiele für CT-Datenauswertung: Virtueller Schnitt für Montagekontrolle (oben) und farbkodierte Wandstärkenmessung (unten)

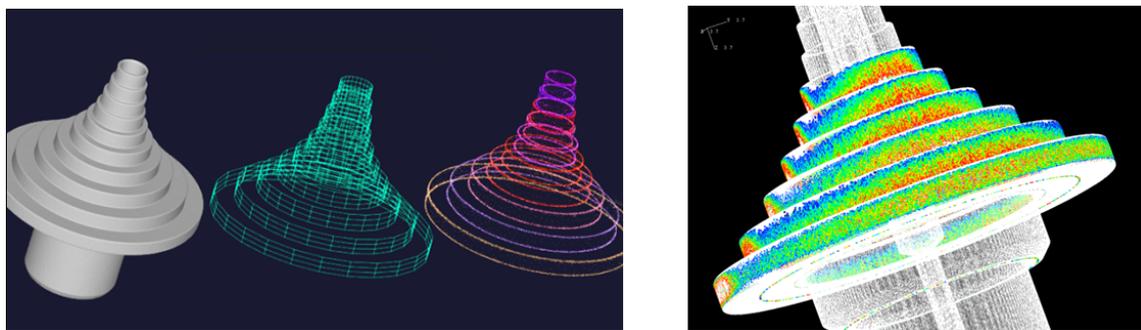


Abbildung 2.9: Beispiel für vielfältige Datenauswertung anhand der CT-Daten eines Stufenzylinders: Dreidimensionelles Messen und Flächenrückführung mit Hilfe der Einpassung von Regelgeometrien und Krümmungsanalyse (links) sowie farbkodierter Soll-Ist-Vergleich zur Formanalyse (rechts)

genannten Anwendungen bedarf es der zugehörigen und geeigneten Oberflächendaten. Hier besteht häufig die Notwendigkeit an aufwendigen softwaretechnischen Nachbearbeitungsschritten, wie Datenreduktion oder -beschneidung, zum Erreichen der Durchführbarkeit der Mess- oder Prüfaufgabe. Dies ist unter anderem begründet durch die entstehenden Datenmengen bei der Oberflächenerzeugung oder durch die Erzeugung nicht relevanter Oberflächenbereiche. Vor allem in diesem Zusammenhang sind die Kosten und der Zeitaufwand zu erwähnen, der bei derartigen Problemen ansteigt und damit die Etablierung der Technologie erschwert.

Die wichtigsten Aufgabenstellungen, die sich nicht, nur unzureichend oder sehr aufwändig mit den gegebenen softwaretechnischen Mitteln bei CT-Daten ausreichender Qualität realisieren lassen, können grob in drei Klassen eingeteilt werden:

- **Materialbasierte Segmentierung:** Dies beinhaltet alle Aufgaben, die sich in irgendeiner Form auf das Material oder die Materialien des zu untersuchenden Bauteils beziehen. Vorwiegend handelt es sich dabei um das Trennen verschiedener Materialien, aber auch um Untersuchungen, die sich auf bestimmte Materialübergänge beziehen, beispielsweise um festzustellen, wie sich zwei unterschiedliche Bestandteile eines Objekts aneinander fügen. Der Bedarf der Materialtrennung kann eine Vielzahl von Gründen haben. Beispielsweise ist häufig von vornherein nur ein Material eines Multimaterialbauteils messtechnisch interessant oder ein Material muss aufgrund auftretender Artefakte separat betrachtet werden, damit überhaupt auswertbare Daten erstellt werden können.
- **Geometriebasierte Segmentierung:** Häufig sind bei messtechnischen Aufgabenstellungen lediglich bestimmte Geometrien von Interesse und nicht das gesamte Bauteil. Diese sollen unter anderen auf Form-, Maß- und Lagetreue untersucht werden, da es sich häufig um wichtige funktionelle Teile der Konstruktion handelt, beispielsweise die zylindrischen bzw. kegelförmigen Spritzlöcher von Dieseleinspritzdüsen, welche die optimale Brennstoffverteilung garantieren müssen.
- **Extraktion bestimmter Bereiche:** Allgemein sind nicht selten nur bestimmte Bereiche eines Bauteils für eine Auswertung relevant, auch unabhängig von Material und Geometrie. Aufgrund der Bauformen typischer CT-Systeme ist es jedoch in vielen Fällen nicht möglich, nur diesen Bereich aufzunehmen. Dies trifft z.B. zu, wenn sich die gesuchte Region im Bauteilinneren befindet, wie bei dem in Abbildung 2.10 dargestellten Faltenbalg eines Greifsystems. Darüber hinaus kann der Grund für eine derartige Problemstellung wiederum in artefaktbehafteten Aufnahmen liegen. Wirken sich derartige Störungen nicht auf das gesamte Voxelmodell und vor allem auf interessante Bereiche aus, sollen diese dennoch separierbar und auswertbar sein.

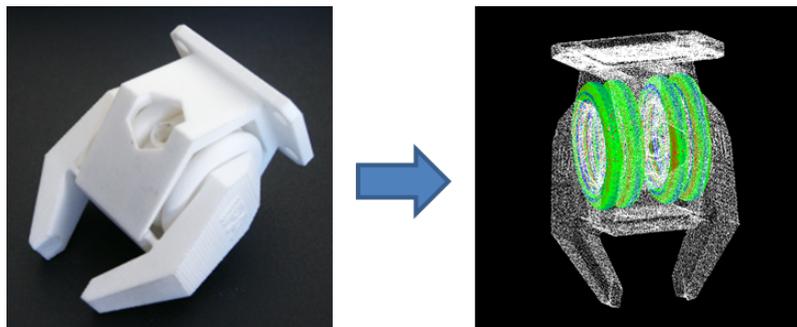


Abbildung 2.10: Foto eines Greifers aus Kunststoff (links) und segmentierte innere Struktur (rechts)

Diese Problemstellungen ergeben sich aus der praktischen Erfahrung bezüglich Anfragen aus allen Bereichen typischer industrieller Anwendungen der CT. Die drei genannten Aufgabenklassen spiegeln folglich die wichtigsten aktuellen Herausforderungen wieder, welche es für die Durchsetzung und weitere Verbreitung der Technologie zu bewältigen gilt.



---

# 3. Stand der Technik

## Oberflächenextraktion aus Voxeldaten

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Möglichkeiten zur Bestimmung von Oberflächen aus Volumendaten gegeben. Hierzu werden zunächst die wichtigsten Grundlagen der Segmentierung und der Grenzflächenfindung aus der Bildverarbeitung erläutert. Dies dient zum einen zum Verständnis unterschiedlicher Herangehensweisen an die gegebene Problematik und zum anderen zur Einteilung und Charakterisierung bestehender Oberflächenextraktionsverfahren. Alle vorgestellten Grundlagen werden stets mit dem Fokus auf ihre Eignung und Relevanz für die 3D-Anwendung auf Volumendaten betrachtet. Ein Schwerpunkt in diesem Abschnitt bildet die modellbasierte Segmentierung, da diese für die hier durchgeführte Entwicklung von großer Bedeutung ist. Des Weiteren werden der Marching Cubes Algorithmus, als häufig eingesetztes Verfahren, ausführlich beleuchtet, seine Vor- und Nachteile dargestellt, sowie weiterführende Forschungsarbeiten zu diesem Thema präsentiert. Darüber hinaus werden alternative Ansätze zur Oberflächenextraktion aus CT-Daten aus aktueller Forschung vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der bestehenden Verfahren und die Ableitung des aktuellen Bedarfs bezüglich der hier betrachteten Problemstellung der aufgabenangepassten Oberflächengenerierung.

### 3.1 Segmentierungsverfahren und Grenzflächenfindung

Die Ergebnisdaten der röntgenbasierten Computertomographie entsprechen, wie im vorangegangenen Kapitel 2 beschrieben, im Prinzip Bildstapeln, welche durch einen

definierten Abstand ein digitales Volumen bilden. Den kleinsten Elementen, den Voxeln, ist ein Grauwert in gegebener Kontrastauflösung zugewiesen, anhand dessen Informationen über das durchstrahlte Material abgeleitet werden können. Um Objekte im entstandenen Voxelmodell messen und weiterverarbeiten zu können, müssen diese identifiziert werden. Das geschieht über die Segmentierung von Bereichen und Bestimmung ihrer Ränder, also der Grenzen zwischen Objekt und Umgebung. Segmentierung bedeutet nach Jähne, dass für jeden Bildpunkt entschieden wird, ob er zu einem Objekt gehört oder nicht [Jäh05]. Es existieren verschiedene Vorgehensweisen, welche sich vorwiegend in der 2D-Bildanalyse entwickelt haben und in ihren zugrundeliegenden Ansätzen unterschieden werden. Diese Klassifizierung lässt sich auf den dreidimensionalen Fall übertragen. Ist also im Folgenden von Pixeln die Rede, kann das beschriebene Vorgehen, falls nicht explizit anders erwähnt, als äquivalent für Voxel angenommen werden.

Die Segmentierung von Bereichen und die Grenzflächen- und Kantenfindung sind eng miteinander verknüpft, da sich beide gegenseitig definieren. Wiederum nach Jähne „ist eine ideale Kante eine Diskontinuität der räumlichen Grauwertfunktion  $g(x)$  der Bildebene“ [Jäh05]. Sie ist folglich durch eine Änderung des Grauwertverlaufs erkennbar. Verfahren zur Detektion von Kanten basieren daher zumeist auf der Betrachtung der ersten Ableitung, weil diese bei deutlichen Signaländerungen Extremwerte annimmt. Senkrecht zur Kantenrichtung liegt also ein hoher Wert der ersten Ableitung vor, während diese entlang der Kantenrichtung klein ist. Auch die zweite Ableitung spielt eine wesentliche Rolle. Sie beschreibt die Krümmung und gibt somit Auskunft über die lokale Form. Ein wachsender Wert der zweiten Ableitung senkrecht zur Kantenrichtung weist auf den Übergang in eine Ecke hin, während eine kleine Krümmung eine Linie beschreibt. Im dreidimensionalen Fall von Volumenmodellen beschreiben Oberflächen die Grenzen unterschiedlicher Bereiche. Hierzu müssen die Eigenschaften der Kantendetektion erweitert werden. Die Signaländerung senkrecht zu einem Oberflächenpunkt ist hier groß, während die Ableitungen erster Ordnung in alle Richtungen gering bleiben. Handelt es sich um einen unstetigen Bereich einer Oberfläche, also eine Kante oder Knick, ist die Ableitung erster Ordnung nur in Kantenrichtung klein. Bei Ecken gibt es in allen Richtungen große Signaländerung.

Bei der Kanten- und Grenzflächenfindung handelt es sich grundsätzlich um eine der Segmentierung untergeordnete Problemstellung, da sich diese lediglich mit einem Teilbereich befasst. In der Praxis überlappen sich die verwendeten Verfahren und Begrifflichkeiten jedoch häufig. In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Oberflächenermittlung aus industriellen CT-Daten entwickelt. Das bedeutet, es werden die Grenzen zwischen verschiedenen Grauwertbereichen gesucht. Hierzu werden Techniken aus beiden Gebieten betrachtet und für die spätere Entwicklungsarbeit herangezogen. Da die Segmentierung als übergeordnet angesehen wird, erfolgt in den

nächsten Abschnitten eine Beschreibung der bekannten Möglichkeiten mit der jeweiligen Erläuterung bezüglich ihrer Bedeutung für die Oberflächenbestimmung aus CT-Daten.

### 3.1.1 Begriffsklärung Histogramm

Da es sich hier um die Betrachtung von Grauwerten und deren Verteilung handelt, bildet das Grauwert-Histogramm häufig eine wichtige Grundlage zur Datenanalyse. In einem Histogramm ist für jeden möglichen Grauwert  $g$  dessen Häufigkeit  $h(g)$  im Bild oder Voxelmmodell aufgetragen. Dies erlaubt bei einem guten Kontrast zwischen Objekt und Hintergrund die erste Identifizierung von Bereichen und liefert Informationen für unterschiedliche Segmentierungsmethoden. Bei schwächeren Kontrasten ist dies nicht mehr gegeben, da sich die Grauwertbereiche verschiedener Objekte überlappen.

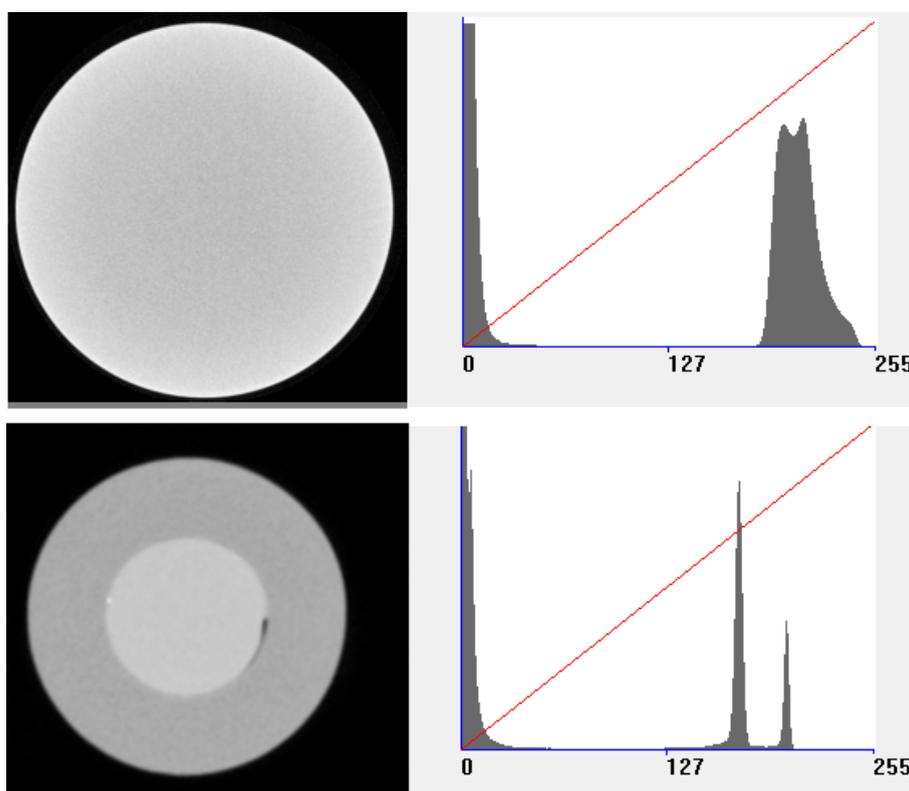


Abbildung 3.1: Beispiel für das Histogramm einer CT-Aufnahme mit einem Material (oben) und mit zwei Materialien mit sehr gutem Kontrast (unten). An der Abszisse ist der Grauwert, an der Ordinate die Häufigkeit oder Anzahl aufgetragen.

Beispiele für Histogramme sind in Abbildung 3.1 neben exemplarischen Schnittbildern durch die zugehörigen Voxelmmodelle der Bauteile dargestellt.

### 3.1.2 Pixelbasierte Segmentierungsverfahren

Die pixelbasierte Segmentierung ist die einfachste Methode zur Zuordnung von Pixeln oder Voxeln. In der Literatur werden diese häufig auch als Schwellwertverfahren

bezeichnet. Ganz allgemein erfolgt hier basierend auf einem globalen Merkmal für jedes Element separat und unabhängig eine eindeutige Zuordnung. Im Fall der Voxeldaten handelt es sich um einen Grauwert, welcher als Schwelle zur Binarisierung genutzt wird. Damit dieses Vorgehen zu einer guten Segmentierungsqualität führen kann, ist es Voraussetzung, dass Objekt und Hintergrund sich im Histogramm deutlich voneinander trennen lassen. Idealerweise existieren zwei eindeutige Maxima, zwischen welchen ein optimaler Schwellwert festgelegt werden kann. Die Nutzung eines globalen Schwellwerts birgt einige Nachteile. Zum einen ist lediglich ein Grauwertbereich vom Hintergrund trennbar, was bedeutet, dass keine Unterscheidung weiterer Materialien möglich ist. Zum anderen ist die Existenz eines geeigneten Schwellwertes in CT-Volumen oft nicht gegeben. Die in Kapitel 2 beschriebene Strahlaufhärtung und Streustrahlung können Inhomogenitäten und Störungen verursachen, die zu einer verbreiterten oder falschen Grauwertverteilung für das gleiche Material anstelle eines eindeutigen Maximums führen. Ebenso ist bei geringen Kontrastunterschieden eine Trennung anhand einer globalen Schwelle schwierig oder sogar unmöglich. Darüber hinaus ist ein relativ homogener Hintergrund eine notwendige Voraussetzung, der bei CT-Aufnahmen durch die verschiedenen Einflüsse häufig verwaschen und gestört sein kann.

#### 3.1.3 Kantenbasierte Segmentierung

Im Gegensatz zu pixelbasierten Verfahren, nutzt die kantenbasierte Segmentierung Nachbarschaftsinformationen und entscheidet unter Einbeziehung von lokalen Merkmalen über die Zuordnung eines Pixels. Hier werden explizit Kanten im Bild identifiziert, welche sich in Form einer starken Intensitätsänderung der Grauwerte bei benachbarten Pixeln darstellen. Eine Kante zeichnet sich folglich durch ein lokales Extremum in der ersten Ableitung oder einen Nulldurchgang in der zweiten Ableitung. Dadurch ist die gefundene Grenzposition lediglich von Gradienten und nicht vom eigentlichen Grauwert abhängig, was zu einer robusteren Segmentierung selbst bei inhomogenem Hintergrund führt. Laut Jähne liefert die kantenbasierte Methode noch ein korrektes Ergebnis, wenn der Hintergrund linear variiert [Jäh05]. Bei stärkerer Abweichung von der Linearität und *Verschmierung* wächst auch der Fehler der Segmentierung. Damit hier eine wirkliche Bereichszuordnung stattfindet, reicht es aber nicht die Grenzpositionen zu identifizieren, sondern diese müssen in einen Zusammenhang in Form einer Kante gebracht werden. Hierzu kann beispielsweise zunächst global ein Startpunkt im Bild ermittelt und ausgehend davon die Fortsetzung der Kante in der Nachbarschaft gesucht werden.

#### 3.1.4 Regionenbasierte Segmentierung

Eine regionenbasierte Segmentierung findet zusammenhängende Bereiche in einem Gebiet direkt und versucht sie nicht über Kanten oder Einzelpunkte zu definieren.

Hier werden Pixel und ihre Nachbarschaften untersucht und auf bestimmte Eigenschaften, wie den Grauwert, verglichen und entsprechend zusammengefasst. Das bekannteste Verfahren ist das Region-Growing Verfahren, bei welchem ausgehend von einem Startpixel das Gebiet sukzessive vergrößert wird, bis keine Pixel mehr zur gesuchten Region „passen“. Die Schwierigkeit besteht darin, geeignete Startwerte zu finden, um die Vollständigkeit des Ergebnisses zu gewährleisten. Vorschläge zu typischen Vorgehen sind unter anderem nachzulesen bei [GW08]. Im Bereich der medizinischen CT kommt Region-Growing häufig zum Einsatz, da es ausreichend robust gegenüber Rauschen ist und sich sehr gut zur Auffindung von mit Kontrastmittel versetzten Gefäßen oder Organen eignet. Beispielsweise wird in [FKDS07] das Volumen des linken Ventrikels auf diese Weise aus CT-Aufnahmen erfasst. Eine weitere verbreitete Methode der regionbasierten Segmentierung ist das sogenannte Split-and-Merge Verfahren, welches ohne einen Startpunkt auskommt [GW08]. Stattdessen werden hier die Bild- oder Volumendaten in gleichmäßige Bereiche unterteilt, solange sie nicht einer festgelegten Bedingung zur Ähnlichkeit unterliegen. Auf diese Weise wird ein Raster zusammenhängender Bereiche geschaffen, welches je nach Abbruchkriterium in einem vorgegebenen Detailgrad vorliegt. In industriellen CT-Daten ist ein Einsatz zur Grobsegmentierung der Grauwertbereiche mittels regionbasierter Verfahren denkbar.

#### **3.1.5 Modellbasierte Segmentierung**

Während alle zuvor genannten Methoden der Segmentierung sich lediglich mit der gegebenen Bildinformation auseinandersetzen, geht der modellbasierte Ansatz einen Schritt weiter. Abgeleitet wird dieses Vorgehen von der menschlichen Fähigkeit, in Bildern bekannte Geometrien, Formen und Strukturen schnell zu finden, auch wenn diese undeutlich oder unvollständig sind [Jäh05]. Unter der Voraussetzung, dass die gesuchten Formen gegeben sind, werden geeignete, eventuell parametrisierbare Modelle genutzt, diese Informationen im Bild wiederzufinden. In den folgenden Unterabschnitten werden drei ausgewählte Verfahren auszugsweise vorgestellt, welche sich zum einen besonders eignen die Thematik darzustellen und zum anderen relevant für CT-Daten allgemein und für die hier durchgeführte Arbeit von Bedeutung sind.

##### **3.1.5.1 Hough-Transformation**

Eine schnelle Form wird mit Hilfe der Hough-Transformation umgesetzt [Har09]. Hier werden für einfache geometrische Elemente, wie eine Gerade oder ein Kreis, geeignete Parameter bestimmt, beispielsweise Steigung und Ordinatenabschnitt oder Mittelpunkt und Radius, welche einen Raum aufspannen, der als Modellraum oder auch speziell als Hough-Raum bezeichnet wird. Der Parameterraum wird genutzt, um das Bild nach dieser Form „absuchen“ zu können. Dazu muss das Bild vorgefiltert und mit Kantensfiltern wie dem Canny- oder Sobel-Operator vorverarbeitet

worden sein. Die Häufung von Bildpunkten für dazugehörige Parameterwerte dient als Entscheidungskriterium. Die derartige Segmentierung bestimmter Geometrien ist einerseits robust gegenüber verrauschten und unvollständigen Abbildungen, andererseits jedoch sehr rechenintensiv.

#### 3.1.5.2 Statistische und deformierbare Modelle

In der Medizin und der medizinischen Bildverarbeitung spielen vor allem bei der Segmentierung in CT-Datensätzen statistische und deformierbare Modelle eine große Rolle [MT96]. Dabei handelt es sich um zweistufige Verfahren. Im ersten Schritt muss ein passendes Modell ermittelt werden, wobei die statische Streuung der Form betrachtet wird. Diese wird zumeist aus einer ausreichend großen und repräsentativen Menge an Trainingsdaten berechnet. Dabei kann es sich um Durchschnittsformen handeln oder um informativere Abbildungen. Als Beispiel sind hier Point Distribution Models zu nennen, kurz PDM, entwickelt von Cootes und Taylor [TCG92], [CT04]. Zu deren Berechnung wird neben dem durchschnittlichen Modell noch die statistische Varianz in Form von Vektoren bestimmt, welche die Formvariation beschreiben. Bei den Datenstrukturen dieser Modelle handelt es sich um eine Konfiguration von Punkten, die die gesuchten Objektgrenzen umschreiben. Im zweiten Schritt erfolgt die eigentliche Segmentierung, welche das PDM der gesuchten Form als Ausgangsbasis zugrunde legt und als deformierbares Modell betrachtet. Das bedeutet, jeder Einzelpunkt der gegebenen initialen Form kann bezüglich seiner Position nach vorgeschriebenen Bedingungen variiert werden. Von Cootes und Taylor wurden zu diesem Zweck die Active Shape Models, kurz ASM, entwickelt [CT92], [CTCG95]. Zunächst wird die Durchschnittsform des PDM bezüglich seiner Lage und Skalierung grob in das zu untersuchende Bild oder Volumen transformiert, so dass die neue Instanz ungefähr beschrieben ist. Im Fall der medizinischen CT-Daten wird im Folgenden für jeden Punkt  $i$  ein Grauwertprofil  $g_i$  entlang der Senkrechten der Objektgrenze an dieser Stelle erstellt. Das bedeutet, alle Grauwerte geschnittener Pixel oder Voxel werden nacheinander in einer endlichen Liste gespeichert. Die Größe der Profile kann an der bekannten Varianz des PDM orientiert werden. Um nun die tatsächliche Objektgrenze zu bestimmen, muss ungefähr bekannt sein, welche Information gesucht wird. Ist beispielsweise die deutlichste Kante gesucht, bestimmt der maximale Gradient im Grauwertprofil die neue Position des Modellpunktes. Handelt es sich nicht um eine derart eindeutige Bedingung, sollte ebenfalls die gesuchte Struktur im Grauwertverlauf mittels Trainingsdaten eingelernt und modelliert werden. Dazu wird für jede Position der Trainingsdaten das lokale Profil links und rechts betrachtet und normiert, um globale Unterschiede in der Helligkeit auszugleichen. Erneut wird der Mittelwert  $\bar{g}_i$  sowie die Kovarianzmatrix  $K_i$  bestimmt. Der so entstehende Verlauf spiegelt sozusagen das typische Muster der gesuchten

Grenze und deren statistische Abweichung wieder. Zur Bewertung der Übereinstimmung im Punkt  $j$  einer neuen Instanzen dient hier die Mahalanobisdistanz  $f(g_j)$ , ein Distanzmaß zwischen Punkten in einem mehrdimensionalen Vektorraum mit

$$f(g_j) = (g_j - \bar{g}_i)^T K_i^{-1} (g_j - \bar{g}_i)$$

Die Berechnung der Mahalanobisdistanz erfolgt entlang des gesamten Grauwertprofils von Punkt  $j$ . Je kleiner  $f(g_j)$ , desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass die Profile  $g_j$  und  $g_i$  zusammenpassen und dass es sich dabei um die gesuchte Objektgrenze handelt. Damit ist die neue Position des Modellpunkts bestimmt, was für alle weiteren gleichermaßen wiederholt werden muss. Im ursprünglichen Verfahren handelt es sich darüber hinaus um eine iterative Berechnung, welche erst abbricht, wenn die Positionsänderungen zwischen zwei Iterationsschritten eine gewisse Mindestgröße unterschreiten. In Abbildung 3.2 ist dieses Vorgehen am Beispiel des Modells einer Hand dargestellt.

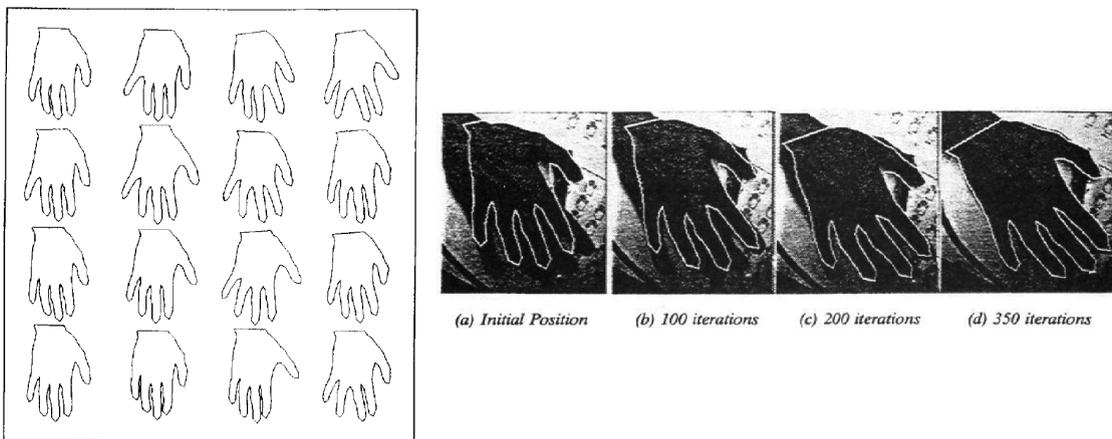


Abbildung 3.2: Beispielsegmentierung mit PDM und ASM: Trainingsdaten für das Modell einer Hand bestehend aus 72 Punkten [TCG92] (links), Adaption des initialen, mittleren Modells der Trainingsdaten in mehreren Iterationsschritten [CT92](rechts)

Derartige Verfahren sind in der bildgebenden Medizintechnik sehr verbreitet. Die deformierbaren Modelle sind laut [MT96] die am häufigsten verwendeten Verfahren zur Segmentierung von Herzkammern in Volumendatensätzen aus CT oder MRT. Beispiele sind zu finden bei [SD03] oder bei [NBF<sup>+</sup>02]. Zur Vertiefung für weitere Einsatzgebiete und Forschungsarbeiten zu diesen Verfahren, wird auf einschlägige Literatur verwiesen. Sie liefern gute Ergebnisse, da sie auf die speziellen Anforderungen und Gegebenheiten der medizinischen CT hin optimiert wurden. Das bedeutet, dass verschwommene und häufig kontrastarme Strukturen gut erkannt werden, während jedoch in keiner Weise auf eine Präzision/Genauigkeit im Sinne der Messtechnik geachtet wird. Die Ortsauflösung liegt Prinzip bedingt bei der Voxelgröße und ei-

ne präzisere Grenzflächenbestimmung bezüglich des realen Objekts ist aufgrund der Aufgabenstellung zumeist nicht notwendig.

### 3.1.5.3 Aktive Konturen oder Snakes

Das Verfahren der Aktiven Konturen hat sich in den letzten 20 Jahren in den verschiedensten Anwendungen als nützliches Werkzeug zur Segmentierung sowohl in Bilddaten als auch in 3D-Datensätzen erwiesen. Vorgestellt wurden die Aktiven Konturen 1987 von Kass, Witkin und Terzopoulos in [KWT88]. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei welchem initiale, parametrische Kurven mit Hilfe von Energieminimierung an Konturen im Originaldatensatz angepasst werden.

Das Prinzip basiert auf den energieminimierenden Modellen. Ähnlich wie bei den ASM wird eine bekannte Kontur als deformierbares Modell zugrunde gelegt, welches in seinen Positionen variiert wird. In der ursprünglichen Veröffentlichung handelte es sich um einen stetigen Spline, der als initiale Kontur vorausgesetzt wird und als parametrische Kurve  $\mathbf{v}(s) = (x(s), y(s), z(s))$  angesehen werden kann. Diese wird wie folgt mit der Energie  $E$  in Verbindung gebracht.

$$E = \int_0^1 E_{int}(\mathbf{v}(s)) + E_{ext}(\mathbf{v}(s)) ds \quad .$$

Bei  $E_{int}$  handelt es sich um die interne, auf Konfigurationen der Kurve selbst basierende Energie und bei  $E_{ext}$  um die externe Energie, welche sich aus den Bilddaten gewinnen lässt. Ziel des Verfahrens ist es, die Form der Kurve zu finden, bei welcher  $E$  minimal wird.

Die Wahl der Bedingungen an diese Energien ist abhängig von der vorliegenden Problemstellung. Nach [KWT88] kann die interne Energie geschrieben werden als

$$E_{int} = (a(s)|\mathbf{v}_s(s)|^2 + b(s)|\mathbf{v}_{ss}(s)|^2)/2$$

Die erste Ableitung  $\mathbf{v}_s(s)$  beschreibt die Starrheit der Kontur und die zweite Ableitung  $\mathbf{v}_{ss}(s)$  die Spannung. Mit  $a(s)$  und  $b(s)$  lassen sich die Terme gewichten, also die Krümmung und die Krümmungsfähigkeit der Kurve regulieren. Die externe Energie beinhaltet Informationen der Bilddaten, wie die Grauwerte und Gradienten. Sie dient zur Detektion von Kanten, Linien und Ecken und sucht Objekte im Bild selbstständig. Oft wird zusätzlich noch die interne Energie  $E_{cont}$  betrachtet, welche die Kontinuität der Kurve bewertet, z.B. die Gleichmäßigkeit der Punktverteilung der Kontur. Eine zusätzliche externe Energie wurde erstmals in [XP97] und [XP98] vorgestellt. Bei den GVF-Snakes (Gradient Vector Flow) wird zusätzlich ein Gradientenvektorfeld des Bildes berechnet, das die Bewegung der Kontur zusätzlich

beeinflusst. Auf diese Weise können beispielsweise konkave Formen zuverlässiger gefunden werden.

Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens liegen nach [KWT88] in Problemstellungen der Kanten- und Liniendetektion, der Erkennung subjektiver Konturen, der Bewegungsanalyse sowie in der Suche von Korrespondenzen in Stereobildern. Im Laufe der Jahre haben sich weitere Anwendungen und Weiterentwicklungen des Verfahrens in vielen Fachgebieten etabliert, sowohl für 2D- als auch für 3D- Segmentierungsaufgaben. Ebenso wie bei den ASM im vorherigen Abschnitt handelt es sich um ein Verfahren, welches häufig Einsatz in der medizinischen Bildverarbeitung findet. Beispielsweise wurde bei [App03] ein semiautomatisches Verfahren zur Segmentierung entwickelt, welches sogenannte *geodätische aktive Konturen* mit minimalem Wissen über die Herzstruktur nutzt, um Teile des Herzens in Volumendaten (entstanden aus Magnetresonanztomographie, kurz MRT) zu segmentieren. Aufgrund seiner Flexibilität und Adaption von verschiedenem Vorwissen eignet es sich zur Segmentierung unvollständiger Strukturen oder Objekte genauso wie zur Auffindung bekannter Formen oder zur Grenzflächenbestimmung in Datensätzen unterschiedlicher Qualität.

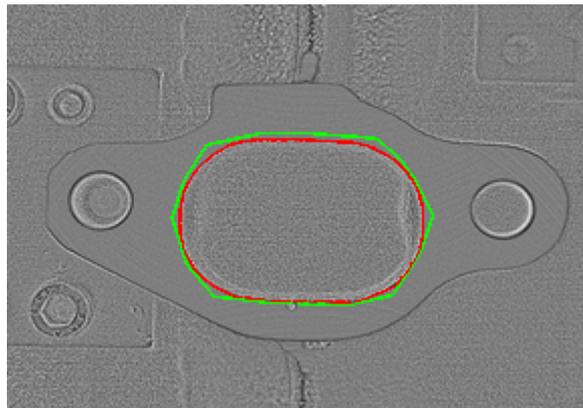


Abbildung 3.3: Beispiel für Konturfindung mit Snakes, Initialkontur grün und gefundene Kontur rot

Bei dem klassischen Verfahren der Aktiven Konturen ist jedoch die Problematik der praktischen Umsetzung zu klären. Da es sich hier um digitales Bildmaterial handelt, muss die Theorie der parametrischen Kurve zur Weiterverarbeitung entsprechend umgesetzt werden. Anstelle einer kontinuierlichen Kurve werden repräsentative Punktmengen betrachtet und jedem Punkt  $\mathbf{p}_i$  wird seine Energie  $E_i$  zugeordnet.

$$E_i = a_i E_{ext,i} + b_i E_{int,i}$$

Durch Variation der Positionen der Punkte und Berechnung der Summe aller Energien lässt sich ein iterativer Prozess zur Energieminimierung durchführen. Zur Lö-

sung des Minimierungsproblems sind unterschiedliche Verfahren denkbar. Während bei [KWT88] über die Abweichungen minimiert wird, schlägt [WS92] einen Greedy Algorithmus vor. Hierbei werden für jeden Punkt lediglich seine Nachbarn zur Energiebetrachtung hinzugezogen. D.h. die Energie wird entsprechend der Energie der Nachbarpunkte normiert und die Position des Punktes derart variiert, dass in diesem lokalen Bereich ein Minimum erreicht wird. Dies wird für alle Punkte der Kontur in einem iterativen Prozess wiederholt bis die Anzahl der verschobenen Punkte in einem Iterationsschritt eine festgelegte Grenze unterschreitet. Dieser Algorithmus ist naiv zu implementieren und liefert eine effiziente Berechnungsmethode der *Snakes*. Eine Schwäche des klassischen Verfahrens ist, dass die Kontur abhängig von der Initialisierung in einem schwächerem, lokalen Minimum konvergiert. Eine Lösung für dieses Problem wurde von Cohen [Coh91] entwickelt und in [CC92] auf den 3D-Fall erweitert. Die sogenannten *Balloons*, geschlossene initiale Konturen, werden von einer zusätzlichen Kraft (*inflation force*) aufgebläht und überwinden damit lokale Minima zugunsten starker oder globaler Energiesenken und führen so zu einer deutlich verbesserten numerischen Stabilität. Dass die initiale Topologie der Kontur vorgegeben ist, wird häufig als weiterer Nachteil aufgeführt, da keine beliebige Adaption der Form ermöglicht wird. Dies löst [MT00] mit den topologisch adaptiven *Snakes*, kurz *T-Snakes*. Hier werden die klassischen *Snakes* mit einer Bildzerlegung (*affine cell image decomposition*) kombiniert. Basierend auf den Schnitten mit der zugrunde liegenden Zellstruktur werden die Konturen zusammengefügt, aufgeteilt und Knotenpunkte bei der Konturvariation neu bestimmt. In Abbildung 3.4 ist der Deformationsschritt mit Neuberechnung der Knotenpunkte und in Abbildung 3.5 sind die topologischen Transformationen dargestellt.

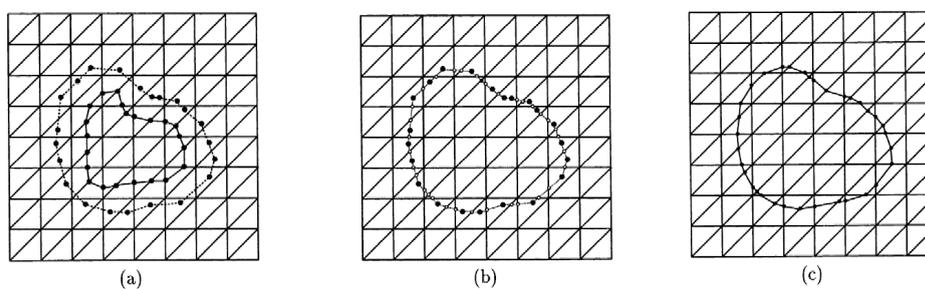


Abbildung 3.4: Vorgehen bei der Neuberechnung der Knotenpunkte der *T-Snakes* basierend auf den Schnitten mit der Zellstruktur des Bildes [MT00]

Es existiert eine Vielzahl an Weiterentwicklungen der Aktiven Konturen. Eine repräsentative Übersicht ist beispielsweise bei [SHB08] zu finden. Generell handelt es sich hier um ein mächtiges Segmentierungsverfahren, das die Merkmalsextraktion unter Berücksichtigung beliebigen Vorwissens über die gegebene oder gewünschte Grenz-

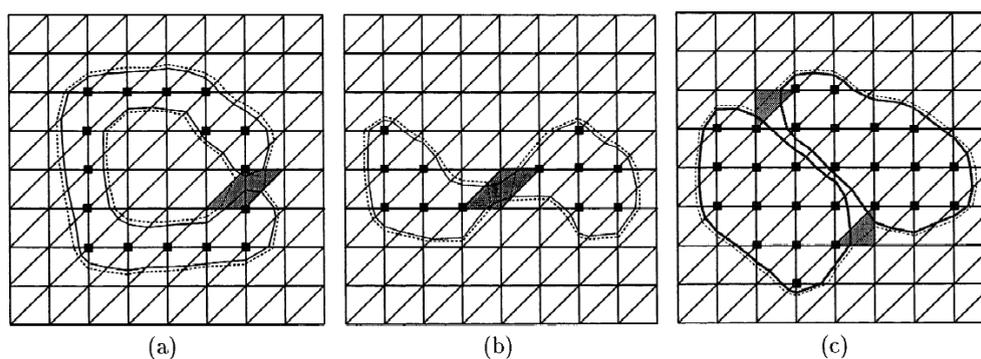


Abbildung 3.5: Topologische Transformationen der T-Snakes, wobei die resultierende Kontur gestrichelt dargestellt ist: a) Selbstüberschneidung einer Kontur, b) Teilung der Kontur und c) Zusammenführung zweier Einzelkonturen [MT00]

kontur oder -fläche in einem Prozess verbindet, was laut [SHB08] den entscheidenden Vorteil des Vorgehens darstellt.

#### 3.1.5.4 Level Sets Methode

Die grundsätzlichen Ideen der Level Sets wurden von Osher und Sethian entwickelt und in den letzten 20 Jahren für Anwendungen in unterschiedlichen Bereichen von der Strömungsmechanik bis hin zur Bildverarbeitung eingesetzt [Set99]. Letzteres beinhaltet Themen wie Segmentierung, Objektverfolgung und Kantendetektion, welche sich sowohl für 2D-Bilder als auch im 3D-Volumen eignen. Das Grundprinzip besteht darin, dass ausgehend von einer initialen, geschlossenen Kurve, die begrenzende Kontur entlang ihres Normalenfelds basierend auf einer Geschwindigkeitsfunktion  $F$  wandert. Bei Level Sets handelt es sich um die Menge der Orte, die zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht werden. Verdeutlicht ist dies in Abbildung 3.6 am Beispiel eines Kreises, der z.B. die Ausbreitung von Wellen beschreiben könnte.

Die Geschwindigkeit kann konstant sein oder zeitlich variieren. Häufig wird die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der aktuellen Krümmung bestimmt, um Unstetigkeiten zu verhindern. Dies wurde bereits 1988 ausführlich behandelt in [OS88]. Die Krümmung kann hier eingesetzt werden, um die Ausbreitungsgeschwindigkeit direkt zu steuern, aber auch zur Beeinflussung der Glattheit der Kontur durch Bestimmung der Bewegungsrichtung in Abhängigkeit des Krümmungswerts. Übertragen auf Bilder oder Volumendaten werden für die Aufstellung der Geschwindigkeitsfunktionen Bildinformationen genutzt, z.B. Gradienten. Ähnlich wie bei den Aktiven Konturen kann hier relevantes Vorwissen in das Verfahren eingebracht werden. In [MSV95] wird ein Modellfindungsverfahren in 2D- und 3D-Bilddaten basierend auf Level Sets präsentiert. Das Vorgehen kann laut [MSV95] als eine Form der Aktiven Konturen angesehen werden. Eine diskretisierte Initialkontur wird hier auf Basis von bildinternen Informationen sowie von Krümmungsinformationen der aktuellen Grenzkontur

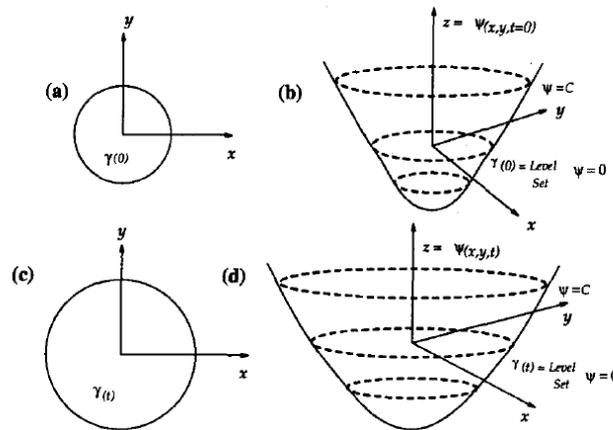


Abbildung 3.6: Level Set Beschreibung einer Kurve  $\gamma$  und der dazugehörigen Menge an allen Orten  $\Psi(x, y)$  für  $t = 0$  in (a) und (b), und für beliebigen Zeitpunkt  $t$  in (c) und (d) [MSV95]

ausgedehnt oder verengt. Anstelle der Energiefunktionen dienen hier die Geschwindigkeitsfunktionen sozusagen als Bewertungsgrundlage für die aktuelle Position der Konturpunkte. Im Unterschied zu den Snakes sind die Ergebnisse hier jedoch unabhängig von der Topologie der initialen Kontur. In Abhängigkeit der lokalen Krümmung wird das Teilen oder Verfeinern der Kontur dynamisch ermöglicht, sodass jede Ausprägung beliebiger Grenzflächen im Bild gefunden wird. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Anwendung findet das Verfahren häufig in der bildgebenden Medizintechnik, speziell für stark verrauschte Bildgebung. Ein ähnliches Verfahren wurde beispielsweise in [LFGW00] für MRT-Daten oder bei [BBML11] für Ultraschalldaten vorgeschlagen. Insgesamt lassen sich die Ansätze leicht auf den 3D-Fall und damit auf CT-Daten übertragen, wie z.B. in [PD01] zur Segmentierung der Leber.

## 3.2 Der Marching Cubes Algorithmus

Wie bereits zuvor in der medizinischen CT hat sich in den letzten Jahren der Marching Cubes Algorithmus nach [LC87] als Standardverfahren zur Oberflächenextraktion etabliert. Es handelt sich um einen erweiterten voxelbasierten Ansatz (siehe 3.1.2), kombiniert mit einem Interpolationsschritt zur Schätzung der realen Grenzfläche und einer vorgegebenen Triangulierung. Dieses Vorgehen verbindet also einen Segmentierungsschritt mit einer direkten Grenzflächenfindung und bietet damit ein angemessenes Werkzeug zur Oberflächenextraktion. In diesem Abschnitt wird das klassische Verfahren beschrieben und direkt mit Blick auf industrielle Anwendungsgebiete bewertet. Schließlich erfolgt ein kurzer Einblick in verschiedene Forschungsarbeiten zum Thema der Verbesserung und Erweiterung des Marching Cubes Algorithmus.

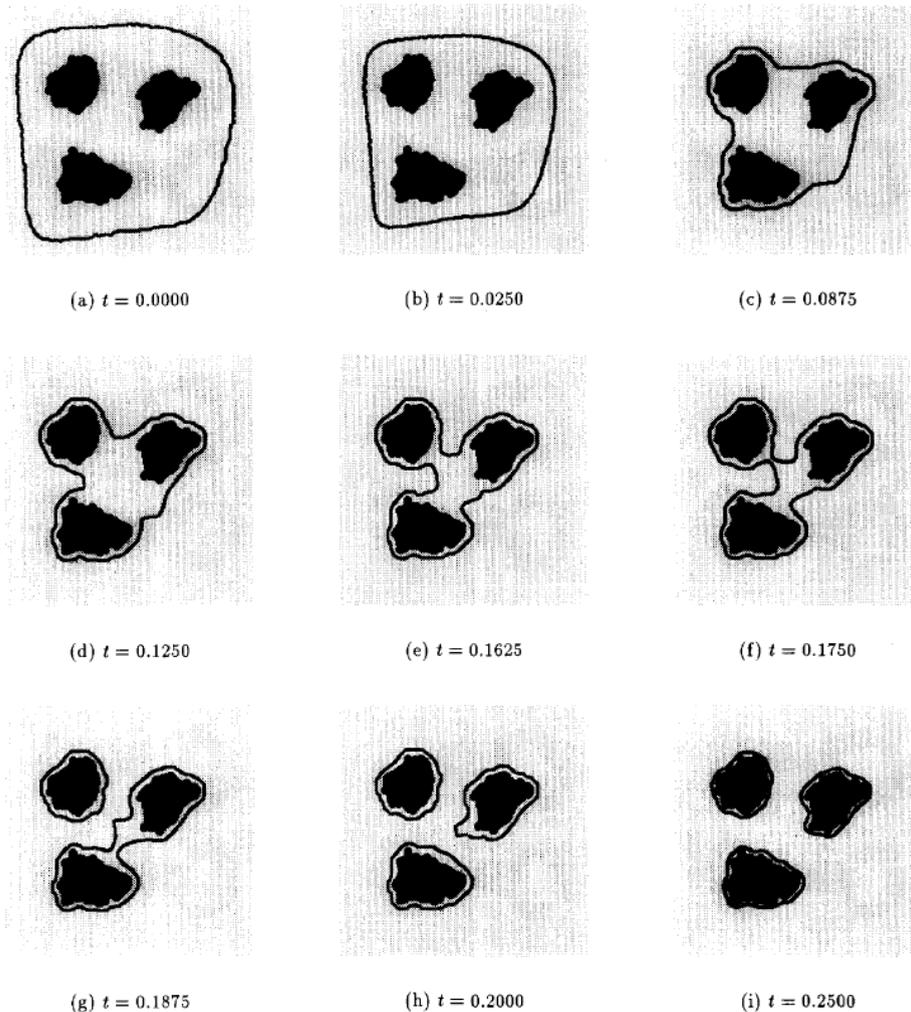


Abbildung 3.7: Beispiel für Konturfindung nach Level Set Methode mit dynamischer, krümmungsabhängiger Topologie [MSV95]

### 3.2.1 Beschreibung des Verfahrens

Beim klassischen Verfahren wird ein globaler Schwellwert vorausgesetzt, welcher den Grauwertübergang zwischen Luft und Material definiert. Dieser wird häufig manuell, beispielsweise mit Hilfe des Histogramms ermittelt. Zunächst wird jeder Voxel als grauwertbehafteter, räumlicher Punkt angesehen. Acht benachbarte Punkte bilden die Ecken eines Würfels. Für einen solchen Würfel werden die Grauwerte jedes Eckpunkts im Vergleich zum Schwellwert betrachtet. Ist der gegebene Schwellwert kleiner als der Grauwert einer Ecke, befindet sich diese sozusagen im Inneren des Objekts. Liegen die Grauwerte zweier benachbarter Ecken nicht beide über oder unter dem Schwellwert, befindet sich ein Oberflächenpunkt des Objekts auf der verbindenden Kante. Für einen Würfel ergeben sich folglich  $2^8 = 256$  Möglichkeiten an Kombinationen von Oberflächenpunkten auf den Kanten, wobei es sich um Permutationen von 14 Basisfällen handelt. Zusammen mit der Möglichkeit keines Oberflächenpunkts ergeben sich 15 Fallunterscheidungen, welche im nächsten Schritt für die Triangu-

lierung unterschieden werden. In Abbildung 3.8 sind diese und die dazugehörigen Dreiecke dargestellt. Die Position der Oberflächenpunkte ermittelt sich durch lineare

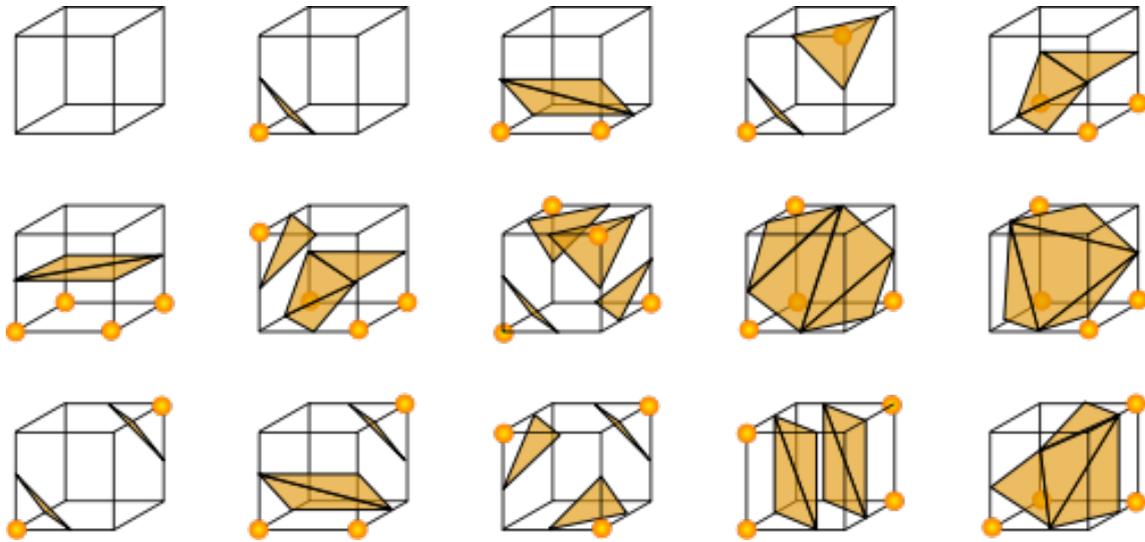


Abbildung 3.8: Fallunterscheidung der Triangulierung des Marching Cubes Algorithmus nach [LC87]

re Interpolation auf der Kante basierend auf den Verhältnissen der Grauwerte zum Schwellwert. Dadurch wird bei einer ausreichenden Datenqualität eine Genauigkeit im Subvoxelbereich erreicht. In [LC87] besteht der letzte Berechnungsschritt in der Ermittlung der Normalen für jeden Dreiecksnetzpunkt. Dazu werden die Gradienten in den Würfecken über die Nachbargrauwerte geschätzt und basierend darauf für den Oberflächenpunkt interpoliert. Diese Normale wird vor allem für die Visualisierung der dreidimensionalen Oberflächennetze über verschiedene Shading-Verfahren, z.B. Gouraud- oder Phong-Shading, benötigt und ermöglicht folglich direkt die Identifizierung von inneren und äußeren Bereichen. Als Ergebnis liefert das Verfahren zusammengefasst vollständige Dreiecksnetze mit Punktnormalen. Die Kantenlängen der Dreiecke und damit die Dichte der Punkte bewegen sich im Bereich der Voxelauflösung der Ausgangsdaten und es werden pro Triangulierungsfall ein bis vier Dreiecke produziert. Damit liefert das Verfahren eine im Detailgrad an die Ausgangsdaten angepasste Oberfläche. Diese wird als Isofläche bezeichnet, da sie einen konstanten Wert, den globalen Schwellwert, in den Ausgangsdaten repräsentiert. Diese Isoflächen eignen sich direkt für die Visualisierung und bzw. oder für die dreidimensionale Weiterverarbeitung.

### 3.2.2 Bewertung des Marching Cubes Verfahrens

Es handelt es sich beim Marching Cubes Algorithmus um ein mächtiges Werkzeug zur Weiterverarbeitung von Volumendaten, sowohl aufgrund seiner einfachen Implementierung als auch dank seiner effizienten Berechnung von flächenhaften 3D-Daten. Dies lieferte die Möglichkeit Volumendaten über Polygonflächen darstellen

zu können, was für die Computergraphik in den 80er und 90er Jahren von enormer Bedeutung war. Auch die einfache und schnelle softwaretechnische Umsetzbarkeit, vor allem durch die Möglichkeit der Nutzung einer Look-Up-Tabelle für die Fallunterscheidung bei der Betrachtung der Würfel, machte den Algorithmus schon in den Anfängen der 3D-Datenverarbeitung zu einem praxistauglichen und angemessenen Verfahren für die Oberflächenerzeugung aus Voxeldaten. Seitdem hat das Verfahren neben der Medizin in den verschiedensten Fachgebieten Anwendung gefunden, wie beispielsweise in der Biochemie bei [HGB93] oder zur Analyse mechanischen und dynamischen Verhaltens mittels FEM (Finite Elemente Methode) bei [MCK<sup>+</sup>99].

Der klassische Algorithmus weist aber auch einige Schwächen auf. Zunächst kann es zu topologischen Fehlern in der Oberfläche kommen. Durch Uneindeutigkeiten bei der Fallunterscheidung der Triangulation entstehen falsche Dreiecke in der Oberfläche, wie in Abbildung 3.9 auf der linken Seite zu sehen ist. Darüber hinaus treten

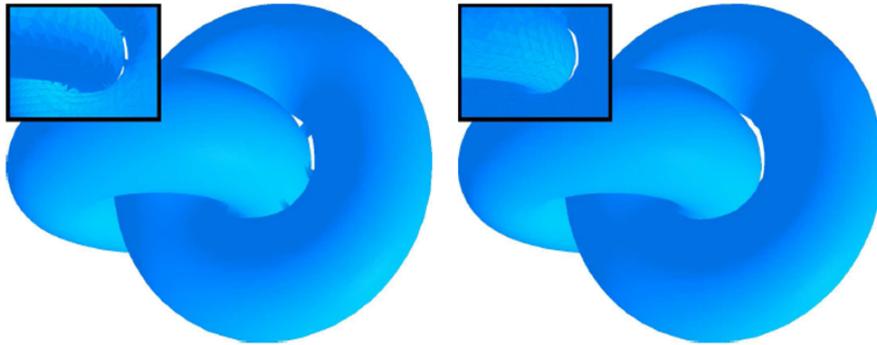


Abbildung 3.9: Sichtbare topologische Fehler durch Uneindeutigkeiten des Marching Cubes Algorithmus (links), Ergebnis der Erweiterung des Algorithmus nach (rechts) [LLWVT03]

degenerierte Dreiecke auf, wenn das Interpolationsergebnis an Eckpunkten diesen entspricht, also mit den Werten 0 oder 1 interpoliert wird [NY06]. Ebenso sind Redundanzen ein bekanntes Problem des Marching Cubes Algorithmus, u.a. beschrieben in [LA93]. Neben topologischen Problemen gibt es weitere Herausforderung, die sich auf die Nutzbarkeit der erzeugten Ergebnisse beziehen. Ein bedeutender Nachteil ist hier die unkontrollierbare Datenerzeugung. Wie bereits erwähnt, geht das Verfahren voxelweise vor und erzeugt somit Dreiecksnetze mit einer Punktedichte ungefähr in der Größe der Voxelaufösung für das gesamte Volumenmodell. Es gibt somit keine Einflussmöglichkeit auf die Netzdichte oder die Möglichkeit diese bei verschiedenen Bereichen eines Volumendatensatzes zu variieren. Das führt häufig dazu, dass sehr große Datenmengen entstehen, die eventuell nicht benötigte Objektteile oder unnötig dichte Oberflächen beinhalten. Diese eignen sich oft nicht optimal zur Weiterverarbeitung, beispielsweise bei eingeschränktem Speicher bei Bearbeitungsprogram-

men, und erfordern zeitintensive Nachbearbeitungsschritte. Hierzu existieren einige Softwareprogramme, die manuelles Beschneiden von Dreiecksnetzen und Punktwolken ermöglichen. Außerdem sind diverse Verfahren zur intelligenten Reduktion und Ausdünnung von Punktwolken und Dreiecksnetzen bereits Stand der Technik, z.B. [GH97] oder [GGK02]. Ein wesentliches Manko besteht im globalen Schwellwertansatz. Ein fester Schwellwert eignet sich nur für gute Kontrastverhältnisse und die Trennung von einem Material und Luft, also zur Erstellung von Isoflächen. Das Verfahren ist somit ideal für Volumenmodelle von Bauteilen, die nur aus einem Material bestehen. In der Realität weisen aber bereits solche Objekte aus gegebenen Gründen (siehe 2.3) starke Grauwertinhomogenitäten im Voxeldatensatz auf, was zu Schwankungen des idealen Schwellwerts führt. Bei dem Vorhandensein mehrerer Materialien kann ein globaler Schwellwert nur einen Bereich erfassen und erlaubt keine oder nur in seltenen Fällen eine direkte Materialtrennung. Auch die Variation des globalen Schwellwerts in einen anderen Grauwert- und somit Materialbereich führt häufig zu keinem qualitativ ausreichenden Ergebnis, da Überlappungen der Grauwertspektren verschiedener Materialien zu inkorrekten Bereichen führen. Das Lösen von materialbasierten Segmentierungsaufgaben, wie in 2.4 beschrieben, ist als nicht möglich. Diese Problematik ist in Abbildung 3.10 an einem Beispiel verdeutlicht. Obwohl sich

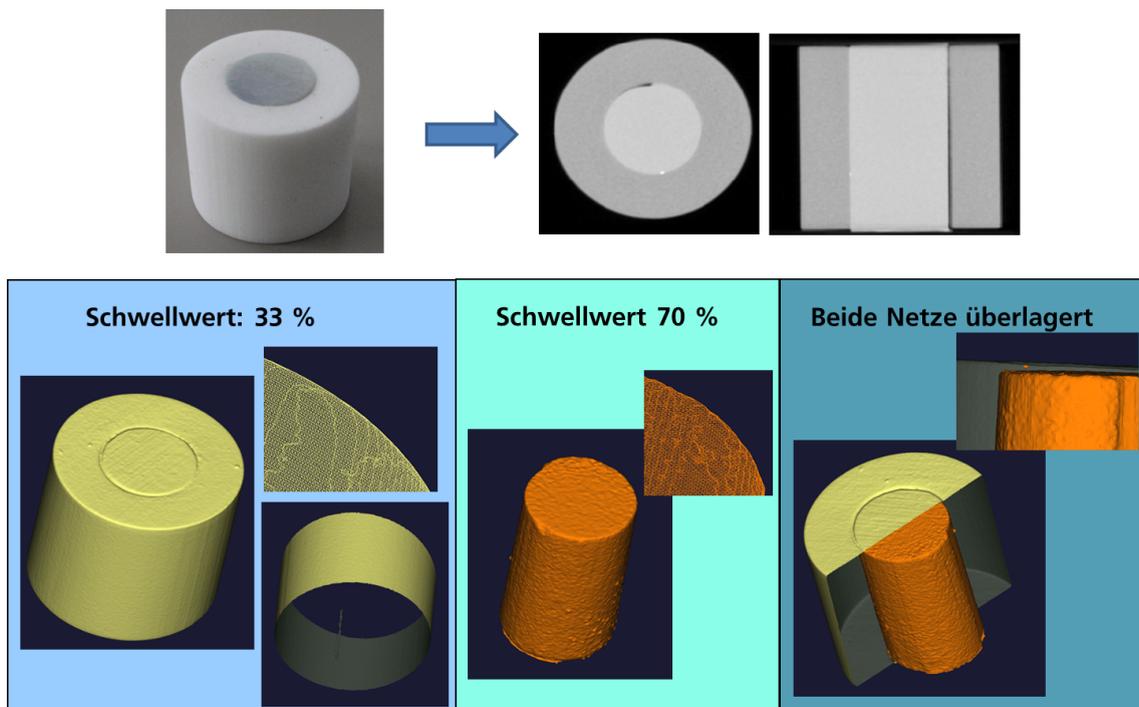


Abbildung 3.10: Versuch der Materialunterscheidung mit MC: Bauteil aus zwei Materialien und dazugehörige CT-Schnitte (oben), Dreiecksnetz bei Schwellwert 33% und bei 70% der Grauwertspanne und Überlagerung beider Ergebnisnetze (unten)

die Grauwerte der beiden Materialien deutlich unterscheiden, führt die Marching Cubes Oberflächenerzeugung mit zwei entsprechend gewählten Schwellwerten nicht

zu einer korrekten Oberfläche. Darüber hinaus ist der äußere Zylinder nicht getrennt berechenbar, da der Berührungsbereich die Schwellwertbedingung nicht erfüllt.

Da der globale Schwellwert lediglich eine Bedingung an die Grauwerte des Voxelmodells stellt, ist ebenfalls keine geometriebasierte Segmentierung oder die Extraktion beliebiger Bereiche nach 2.4 möglich. In Abbildung 3.11 ist dies am Beispiel der Kuppe einer Dieseleinspritzdüse dargestellt. Der Marching Cubes Algorithmus erzeugt stets die vollständige Oberfläche, hier 580270 Punkte. Für die spätere Weiterverarbeitung in einer Simulationssoftware ist jedoch nur die reale Lage und Form der kegelförmigen Spritzlöcher von Interesse, also innere Geometrien, welche durch manuelles Beschneiden oder einen zusätzlichen messtechnischen Einpassschritt separiert werden. Beides erfordert einigen Aufwand und beeinträchtigt die Ergebnisqualität stark. Die relevanten Bereiche sind durch 12800 Punkte beschrieben, also nur knapp über 2 % der ursprünglichen Datenmenge. In Abbildung 3.11 ist das manuell aufgeschnittene Oberflächenmodell dargestellt und der Qualitätsverlust vor allem an den Rändern (in der Vergrößerung) sichtbar.

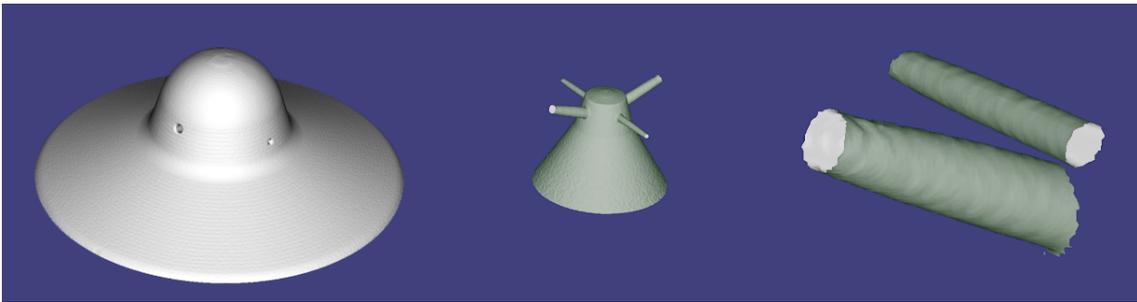


Abbildung 3.11: STL der Kuppe einer Dieseleinspritzdüse mit MC vollständig (links) und teilweise manuell beschnitten (Mitte) und reduziert auf die Spritzlöcher (vergrößert) (rechts)

Ein zusätzlicher Punkt, der als Nachteil zu nennen ist, bezieht sich auf artefaktbehaftete CT-Daten. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, kann es durch verschiedene Einflüsse zu Störungen in Form von Artefakten in den Volumendaten kommen. Vor allem bei Bauteilen aus Materialien mit stark unterschiedlichem Verhalten in der Durchstrahlung, z.B. Kunststoff und Metalle bei Elektronikteilen, kommt es zu einer Beeinflussung des „weicheren“ Materials, was eine angemessene Oberflächenerzeugung mit einem globalen Schwellwert unmöglich macht. Solch verrauschte Oberflächenteile eignen sich im Allgemeinen nicht zur Weiterverarbeitung. Es kommt jedoch vor, dass Artefakte nicht das gesamte Bauteil betreffen und einige Bereiche ausreichend gut im Voxelmodell abgebildet sind. In Abbildung 3.12 ist ein Aluminiumbauteil mit Stahlmuttern im oberen Bereich zu sehen. Im Schnittbild durch das Voxelmodell sind die Dichteunterschiede deutlich erkennbar sowie die Strahlaufhärtungsartefakte im unteren Bereich der Bodenplatte durch die große Durchstrahlungslänge. Das Er-

gebnis des Marching Cubes Algorithmus mit automatisch bestimmtem Schwellwert weist starke Auswirkungen des Stahls (oben) und der Strahlauhärtung (unten) auf. Der mittlere zylindrische Bereich ist aber wenig beeinflusst und eignet sich mit der richtigen Wahl des Schwellwerts durchaus zur Weiterverarbeitung.

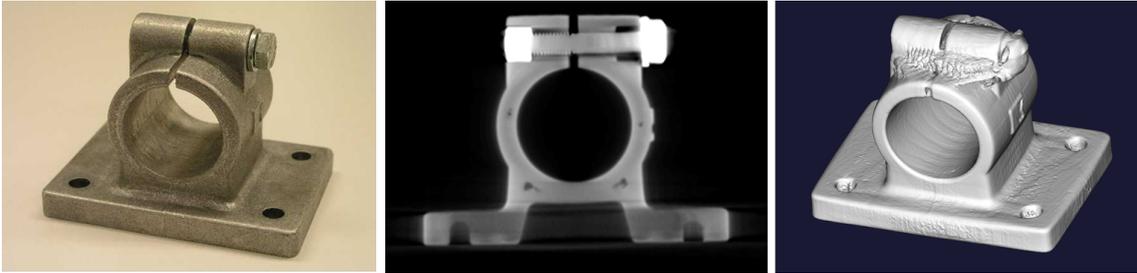


Abbildung 3.12: Foto eines Bauteils aus Aluminium und Stahl (links), ein Voxel-schnittbild der dazugehörigen CT-Aufnahme (Mitte) und das Ergebnis des Marching Cubes Algorithmus mit sichtbaren Störungen (rechts)

In Abbildung 3.13 ist dieser Effekt bei einer Kombination aus Kunststoff und Aluminium zu sehen. Mit einem globalen Schwellwert, der die Oberfläche des Kunststoffs gut ermittelt (ca. 5 % der Kontrastverteilung von  $2^{16}$  Grauwerten in diesem Beispiel), sind die Bereiche um die Metallstifte gestört, obwohl sich diese mit einem anderen Schwellwert (ca. 35 %) ebenfalls extrahieren lassen.



Abbildung 3.13: Foto eines Bauteils aus Kunststoff mit Metallstiften (Aluminium), Schnittbild des Voxelmodells, Marching Cubes Ergebnis mit Schwellwert bei 5 % und bei 35 % (von links nach rechts)

Der pixelbasierte Ansatz führt weiterhin dazu, dass keine Rücksicht auf das gesuchte Objekt genommen und jegliches entfernte Rauschen, Partikel und äußere Materiali-

en in das Ergebnisnetz miteinbezogen werden, solange sie der Schwellwertbedingung genügen. Da es bei der Aufnahme von industriellen CT-Daten Halterungen und Füllmaterial zur Fixierung der Bauteile bedarf, ist das Vorhandensein von zusätzlichen Objekten im Volumendatensatz keine Seltenheit. Auch hier können die entstehenden unnötigen Teile im Ergebnisnetz nur durch zusätzliche Nachbearbeitung entfernt werden.

Zusammenfassend ist der Marching Cubes Algorithmus ein effizientes und praktisches Verfahren zur Erzeugung von Isoflächen, liefert aber aufgrund der beschriebenen Problemstellungen einige Herausforderungen, um eine Anwendbarkeit in der industriellen Praxis einwandfrei zu ermöglichen.

### 3.2.3 Forschungsarbeiten zum Marching Cubes Verfahren

In der Vergangenheit haben sich bereits viele Forschungsarbeiten mit der Erweiterung und Verbesserung des Marching Cubes Verfahrens beschäftigt, häufig mit dem Fokus auf die Auswertung medizinischer CT-Daten. Einer der wichtigsten Aspekte ist das Beheben von eindeutigen Fehlern in den entstehenden Ergebnisdaten, weshalb sich eine Vielzahl von Arbeiten mit der Vermeidung oder Korrektur der topologischen Uneindeutigkeiten, Degenerationen und Redundanzen beschäftigt. Solche Fehler können beispielsweise bei der Betrachtung von Bauteilstrukturen im Mikrometerbereich schwere Folgen für die Bauteilanalyse haben und sind darum für die industrielle Anwendung nicht akzeptabel. Eine Lösung entstand mit Hilfe eines Verfahrens von Lewiner und Lorensen aus dem Jahr 2003 [LLWVT03]. Hier erfolgt die Erweiterung des klassischen Vorgehens um zusätzliche Fallunterscheidungen uneindeutiger Konstellationen, welche nach [Che95] durch die rechnerische Grauwertschätzung im Würfelinneren klassifiziert werden. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.14 zu sehen und eine optimierte Oberfläche ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

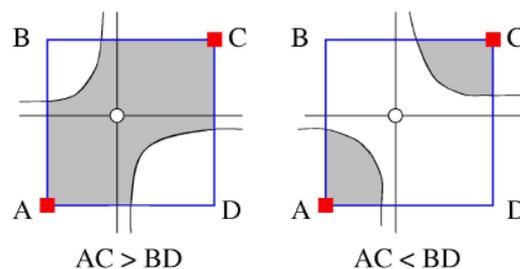


Abbildung 3.14: Test zur Auflösung von Uneindeutigkeiten nach [Che95]

Degenerierte Dreiecke lassen sich leicht vermeiden, indem nur ein Schwellwert erlaubt wird, der nicht als Grauwert im Volumen vorkommt [GW94]. In [NY06] ist eine ausführliche Zusammenfassung bestehender Arbeiten und Veröffentlichungen zur Problematik der Erkennung, Vermeidung oder bzw. und Korrektur topologischer Fehler

gegeben. Darunter ist die Nutzung anderer geometrischer Strukturen als Grundlage für die Triangulierung zu finden. In [ST90] werden die Voxel in Tetraeder zerlegt und für diese analog zum Marching Cubes Verfahren vorgegangen. Für die Triangulierung existieren hier lediglich drei Fallunterscheidungen. Uneindeutigkeiten treten nicht auf, jedoch werden ungefähr doppelt so viele Dreiecke erzeugt wie beim klassischen Vorgehen. Andere Datenstrukturen werden auch zum Zweck der Laufzeit- und Speicheroptimierung eingesetzt. Hierarchische Geometrien finden Einsatz um unnötige Untersuchungen leerer Bereiche zu umgehen. Bei [WG92] wird im Voxelmodell eine Octree-Struktur aufgebaut, die Elemente mit gleichen oder ähnlichen Werten zu größeren Würfeln zusammenfasst. Nur Bereiche, in denen sich Grenzbereiche befinden, werden gemäß einer definierten Größe aufgelöst, während die übrigen Bereiche grob bleiben. Auf diese Weise reduziert sich die Anzahl der zu betrachtenden Würfel für die Oberflächenbestimmung. Ähnliches erreicht [CMM<sup>+</sup>97] mit dem Einsatz des Intervallbaums oder durch die Repräsentation der Ausgangsdaten im sogenannten *span space*, siehe [LSJ96]. Auch zur optimierten Visualisierung der resultierenden Oberflächen finden intelligente Repräsentationen der Daten mit Hilfe von Mehrfachauflösungen Anwendung, z.B. bei [DDF02]. An dieser Stelle soll erneut auf die ausführliche Beschreibung zur Optimierung des Verfahrens und Variation der Datenstrukturen bei [NY06] hingewiesen werden.

Nicht nur die Fehlerbehebung, sondern auch die Verbesserung der Netzqualität spielt eine wichtige Rolle. Der klassische Marching Cubes Algorithmus erzeugt nicht nur degenerierte, sondern auch „unschöne“, unregelmäßige Dreiecke. Damit sind spitze Winkel und unterschiedliche Kantenlängen gemeint. In [DSS<sup>+</sup>09] wird das Verfahren MACET (Marching Cubes uses Edge Transformation) vorgestellt, welches das ursprüngliche Gitter der Marching Cubes Würfelstruktur variiert, um solche Dreiecke zu vermeiden und ein gleichmäßiges Dreiecksnetz zu erhalten. Die ursprünglichen Netzverbindungen bleiben erhalten, es werden jedoch zusätzlich aktive Kanten eingeführt. Dabei handelt es sich um die Kanten, die nach dem klassischen Vorgehen einen Oberflächenpunkt beinhalten. Die beiden dazugehörigen Endpunkte werden hier derart vertikal und orthogonal zur Kantenrichtung verschoben, dass der interpolierte Schnittpunkt in einem definierten Verhältnis dazwischen liegt. In Abbildung 3.15 ist dieses Vorgehen in zwei verschiedenen Varianten verdeutlicht.

Die Problematik der globalen Schwelle ist beim Marching Cubes Verfahren häufig die Ursache für fehlerhafte Oberflächen. Dabei ist es zunächst nicht trivial einen angemessenen Schwellwert festzulegen. Bereits eine geringe Variation beeinflusst die resultierende Oberfläche unter Umständen enorm, sodass für messtechnische Anwendungen reproduzierbare und automatische Schwellwertbestimmungen notwendig sind. Gängige Verfahren arbeiten mit Histogrammanalysen. Beispielsweise werden prozentuale Grauwertverteilungen geschätzt oder Normalverteilungen approximiert.

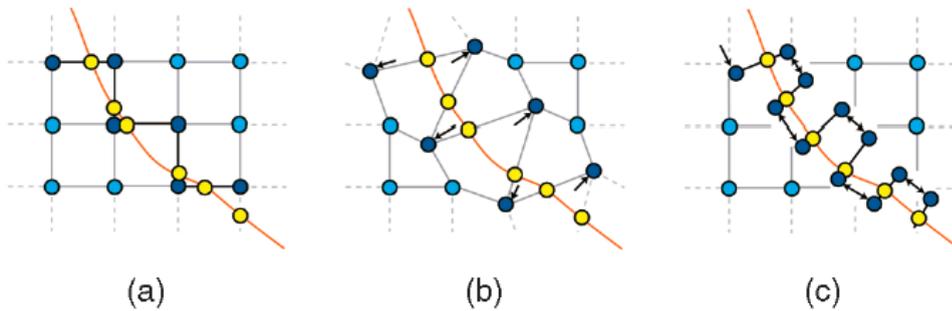


Abbildung 3.15: Netzvariationen nach MACET: (a) Ergebnisse des Marching Cubes, (b) erste Variante MACET: bewege die Punkte entlang des Gradienten der Isofläche, (c) zweite Variante von MACET: bewege die Punkte parallel zu den Isoflächen [DSS+09]

Letzteres geht davon aus, dass sich Luft und Material durch Häufungen im Histogramm abbilden. Eine der bekanntesten Methoden zur Schwellwertbestimmung ist das Otsu-Verfahren nach [Ots79] bei welchem ein Schwellwert gesucht wird, der den Quotient zwischen den Varianzen zweier Grauwerthäufungen im Histogramm maximiert (Beispiel in Abbildung 3.16). Das Verfahren ist sehr gut geeignet bei hohem Kontrast zwischen Materialien, ist jedoch sehr anfällig gegenüber Bildrauschen und kleine Änderungen des Schwellwertes führen zu starken Ergebnisschwankungen. Die Ergebnisse globaler Schwellwertverfahren lassen sich nach [GW08] unter anderem durch vorherige Datenglättung oder durch eine vorgeschaltete Kantensuche verbessern.

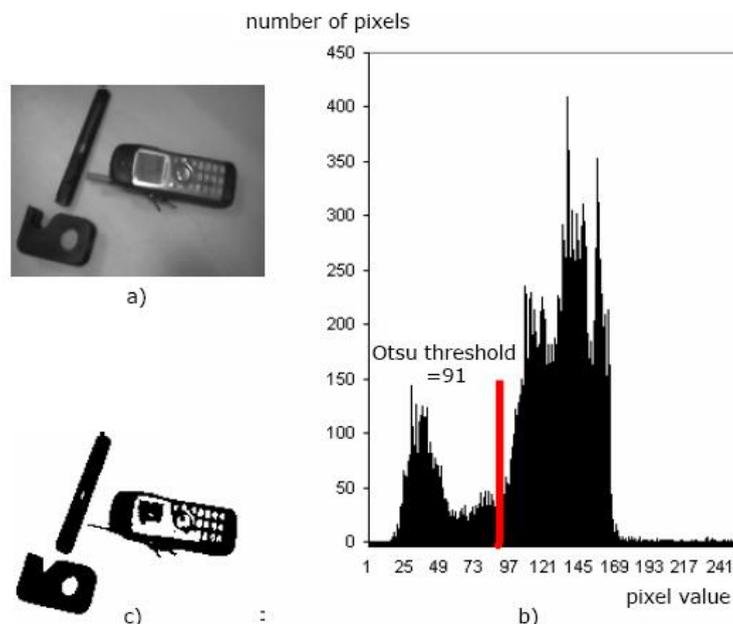


Abbildung 3.16: Beispiel für das Otsu-Verfahren: (a) Originalbild, (b) Histogramm mit automatisch berechnetem Schwellwert, (c) Ergebnisbild [Int]

Andere Möglichkeiten, die Nachteile einer globale Schwellen zu überwinden, ist der Einsatz lokaler, adaptiver Schwellwerte. Ein naheliegender Ansatz ist die Nutzung des Otsu-Verfahrens nur in Teilbereichen eines Datensatzes. Hierbei muss jedoch auf die Stetigkeit an den Teilübergängen geachtet werden.

Ein anderer Ansatz für lokale Schwellwertberechnung beim Marching Cubes ist bei [AYK03] zu finden. Der Grauwert eines Voxels wird als Volumenwert des Originalobjekts herangezogen und für jeden gefundenen Oberflächenpunkt wird der Schwellwert derart angepasst, dass der Volumenanteil im Ergebnis erhalten bleibt. Diese Methode nennt sich darum volumenerhaltend („Volume Preserving“). Sie eignet sich zur Verfeinerung kleiner Strukturen, ist jedoch nach wie vor nur für ein Material geeignet und empfindlich gegenüber Rauschen. In [Ble08] wird eine dynamische, lokal adaptive Variante des Marching Cubes Verfahrens vorgeschlagen. Dazu wird für jeden gefundenen Oberflächenpunkt ein eigener Schwellwert neu berechnet. Die kubische Umgebung des ausgehenden Voxels wird iterativ vergrößert und jeweils der Median bestimmt, bis ein Konvergenz- oder Abbruchkriterium erreicht wird. Die neuen Schwellwerte gehen in Form einer trilinearen Interpolation der Nachbarschaftsumgebung in die Dreiecksgenerierung ein. Laut [Ble08] wird dadurch eine nennenswerte Verbesserung der Daten erreicht, siehe Abbildung 3.17.

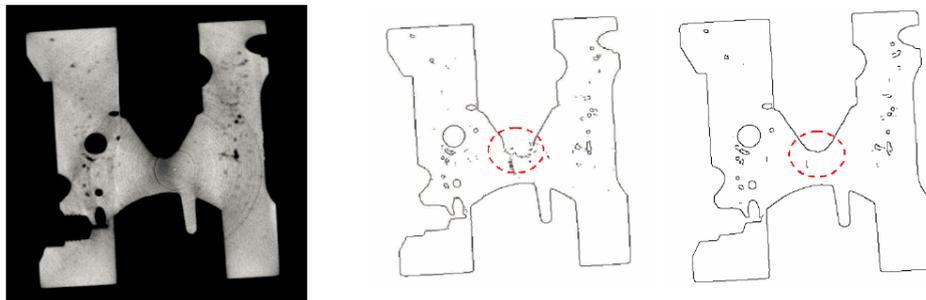


Abbildung 3.17: Verbesserte Oberflächenfindung: Schnitt durch das Volumen eines Vergasers (links), die dazugehörige Kontur der Grenzfläche mit globalem Schwellwert (Mitte) und nach Verfahren [Ble08](rechts)

Auch [Ste05] stellt in seinem Werk zwei Varianten der Oberflächenextraktion vor, die ausgehend vom Marching Cubes Ergebnis die lokale Umgebung der Punkte zur Verbesserung der Qualität nutzen. Im Gegensatz zum vorherigen Verfahren wird hier nicht die Nachbarschaft und die dazugehörige Grauwertverteilung betrachtet, sondern das Grauwertprofil entlang seiner Oberflächennormalen. Dieses wird unter Berücksichtigung der relativen Weglängen durch die von der Normalen geschnittenen Voxel aufgetragen. Eine Variante berechnet hiermit die Mitte des größten negativen Gradienten, die zweite Variante sucht in diesem Bereich einen vom Anwender vorgegebenen Mindestgradienten zwischen Material und Luft. Die zweite Variante dient zur Verminderung des Einflusses von Rauschen und Strahlaufhärtungsartefakten.

Bei beiden Vorgehensweisen wird so ein neuer Grenzwert bestimmt und dies für die umgebenden Punkte der Netzstruktur wiederholt. Der lokale Schwellwert errechnet sich aus einer Mittelung aller gefundenen Grenzwerte der jeweiligen Nachbarschaft. Zu diesem wird der im Grauwertprofil zugehörige Verschiebungsvektor bestimmt und der ursprüngliche Oberflächenpunkt entsprechend bewegt. Auf diese Weise bleibt die Netzstruktur erhalten und es treten keine Diskontinuitäten auf. Die letzten beiden Verfahren wurden speziell für das dimensionale Messen mit Computertomographie entwickelt und berücksichtigen daher bereits grundlegende Anforderung an eine derartige industrielle Anwendung, wie beispielsweise hohe Genauigkeitsanforderungen und Störungen durch Rauschen oder Artefakte.

## 3.3 Alternative Ansätze zur Oberflächenbestimmung in 3D-Volumendaten

Neben der Optimierung und Erweiterung des Marching Cubes Verfahren haben sich mit Aufkommen der CT einige Arbeiten mit alternativen Vorgehensweisen zur Bestimmung der Oberflächen aus volumetrischen Daten beschäftigt. In diesem Abschnitt werden verschiedene Ansätze aus Literatur und aktueller Forschung vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf Methoden eingegangen, die für die industrielle Messtechnik praktische Relevanz haben. Es existiert eine Vielzahl an Ansätzen aus dem medizinischen Umfeld, welche aber aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen den Fokus auf andere Aspekte legt als in der industriellen Anwendung.

Ein naheliegender Ansatz ist in [ZTHL02] vorgestellt. Hier wird nicht das Volumen als dreidimensionales Modell, sondern die einzelnen Schichten separat betrachtet. In diesen erfolgt ein Oberflächen-Tracking ausgehend von einem oder mehreren Startpunkten. Um die Konsistenz zwischen den Schichten zu wahren, werden immer für die folgende Schicht vorab Korrespondenzen für die Startpunkte gesucht. Im letzten Schritt des vorgestellten Algorithmus erfolgt eine Triangulation, die aufgrund der bekannten Zusammenhänge zwischen den Schichten über eine Look-Up Tabelle realisiert wird. Diese Arbeit beschäftigt sich im Wesentlichen mit der effizienten Speichernutzung und ermöglicht durch das schichtweise Vorgehen eine Verarbeitung großer Datenmengen auf Standard-PCs. Außerdem lässt sich die Größe der Ergebnisnetze leicht über das Weglassen von Schichten direkt bei der Erzeugung realisieren, sodass aufwendige Nachbearbeitung unnötig ist.

Auch in [MZFC09] werden bestehende Verfahren zur zweidimensionalen Kantenerkennung für die dreidimensionale Oberflächensuche in Volumendaten herangezogen. Obwohl es sich hier um ein für Medizindaten entwickeltes Verfahren handelt, ist

es aber aufgrund seiner lokalen Kantensuche und Genauigkeitsanforderungen an die Datenextraktion für die hier betrachtete Anwendung sehr interessant. Dabei handelt es sich um die 3D-Erweiterung des 2D-Verfahrens von Desolneux, Moisan und Morel [DMM01], welches für jede Kante die kontrastoptimierte Position bestimmt, basierend auf statischen Tests nach dem Helmholtz-Prinzip ([Gre07] oder [DMM08]). In [MZFC09] werden statt Kanten Oberflächenpatches gesucht, die sogenannten „Level Surface Patches“. Dafür wird das 3D-Volumen zunächst mittels Gradientenbestimmung in ein Kontrastbild bzw. -volumen umgewandelt. In diesem werden, vereinfacht ausgedrückt, mögliche Oberflächenbereiche einem statistischen Test unterzogen, welcher die Wahrscheinlichkeit einer Grenzfläche bewertet. Die positiv eingestuften Flächen können zu einem Ergebnisnetz zusammengefasst werden. Da im 3D-Fall nicht alle Variationen von Oberflächenpatches untersucht werden können, werden hierzu vorab einige Annahmen getroffen, die die Suche optimieren. Das Verfahren arbeitet durch die gradientenbasierte und kontrastoptimierende Bewertung für jeden Oberflächenteil lokal und ermöglicht die unabhängige Bestimmung von Oberflächenbereichen mit variierenden Kontrastunterschieden. Bei den Ergebnisdaten handelt es sich um Oberflächenpatches, deren Anzahl optimal klein gehalten werden kann. Damit werden deutlich geringere Datenmengen als beispielsweise beim Marching Cubes Verfahren erzeugt, welche sich sehr gut zur Visualisierung und Weiterverarbeitung eignen. Mit anderen Nachteilen des Marching Cubes Verfahrens, den topologischen „Schönheitsfehlern“ und der entstehenden Dreiecksmenge, beschäftigen sich unter anderem [WSBD00] und [SSS06]. Ersterer erzeugt zunächst ein grobes Oberflächennetz mit garantierter Topologie und beginnt ausgehend davon eine Netzverfeinerung. Dazu werden Energiefunktionen oder Kräfte bestimmt, die die Distanz zwischen der aktuell gegebenen Kontur und der im Volumen durch einen großen Gradienten definierten Grenzfläche bewerten. Diese Größe ist die Bedingung für eine Unterteilung und Neupositionierung eines Dreiecks. Der zweite hier vorgestellte Algorithmus basiert auf der sogenannten *Advancing Front (Afront)* Technik und ermöglicht die Oberflächenextraktion aus regulären und irregulären Voxelstrukturen, garantiert eine reale Iso-Oberflächenbeschreibung und passt sich adaptiv entsprechend der Oberflächenkrümmung an. Grundsätzlich wird hier ausgehend von einem Startpunkt aus der Oberfläche sukzessive um zugehörige Kanten und schließlich um Dreiecke erweitert. Dieses wachsende Netz wird als *front* bezeichnet. Mit dieser Form der Oberflächengenerierung, speziell der impliziten Form der Polygonisierung einer Oberfläche aus Volumendaten, beschäftigten sich bereits [Blo88], [Har98] oder [ZBL09]. Beim klassischen Vorgehen, wird eine Dichte für die Polygonisierung vorgegeben. Dies kann jedoch dazu führen, dass zu kleine Details verloren gehen oder dass wieder viele unnötige Dreiecke generiert werden. Bei [SSS06] wird ein sogenanntes Guidance Field genutzt, um die Dreiecke adaptiv zur Oberflächenkrümmung zu er-

zeugen. Dies garantiert eine ausreichende Abbildung von kleinen Extremitäten bei gleichzeitig minimaler Netzgröße. Nachbearbeitungsschritte wie Netzreduktion sind hierbei unnötig. Im Guidance Field werden vorab die lokale Krümmungsbereiche bestimmt, sodass die notwendige Kantenlänge direkt bei der Erzeugung abgelesen werden kann. Die Kantenfindung erfolgt über gradientenbasierte, implizite Funktionen. In Abbildung 3.18 ist der Vergleich zwischen Marching Cubes Ergebnissen dargestellt und die Verbesserung der Netzstruktur deutlich erkennbar. Während sich die

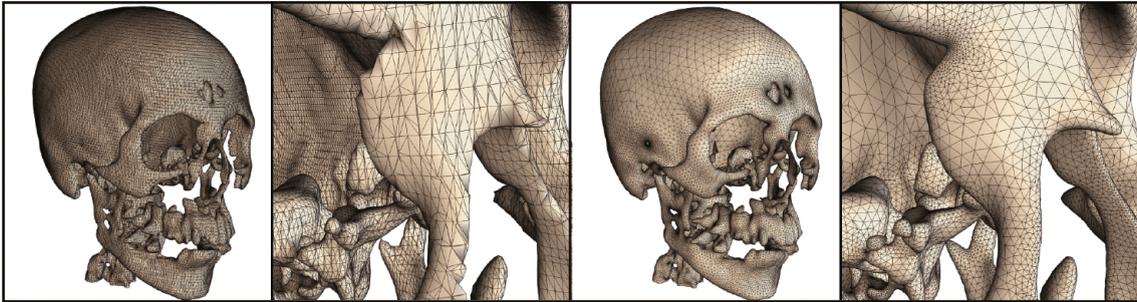


Abbildung 3.18: Triangulierung nach Marching Cubes (links), Triangulierung nach Schreiner et al. mittels Afront-Technik und krümmungsbasierten Guidance Fields (rechts) [SSS06]

bisher vorgestellten Arbeiten vorwiegend mit der Rekonstruktion einer Oberflächen-grenze beschäftigen, orientieren sich einige Arbeiten bei der Netzerzeugung an dem späteren Verwendungszweck bzw. der Aufgabenstellung. So werden in [CVNTE07] direkt Tetraedernetze aus Volumendaten erzeugt, die für eine interaktive Volumen-visualisierung und für bestimmte Simulationsaufgaben optimiert sind. Dafür wird ein Delaunay-Tetraedernetz erzeugt, wobei Subnetze die homogenen Bereiche des Volumens darstellen. Dies wird durch Ähnlichkeitsbewertung, kombiniert aus Voxel-information und geometrischen bzw. topologischen Merkmalen, erreicht. Auf diese Weise entstehen segmentierte 3D-Volumennetze, die effizient gerendert werden können und damit beispielsweise die visuelle Unterscheidung verschiedener Materialbe-reiche ermöglichen. In [HSOS10] wird explizit das Thema der Multi-Material Analyse in industriellen CT-Daten behandelt. Hierzu erfolgt im ersten Schritt die Klassifi-zierung bestimmter Bereiche im Voxelvolumen, definiert über das jeweilige Material bzw. den dazugehörigen Grauwertbereich. Dies geschieht mittels klassischen Seg-mentierungsverfahren. Zunächst ermittelt ein Region Growing Schritt grob die ver-schiedenen Materialbereiche und ordnet die eindeutigen Voxel diesen zu. Die Voxel, die den Materialübergang beschreiben, werden zunächst als „unsicher“ klassifiziert und anschließend mit Hilfe des Graph-Cut-Verfahrens sequentiell den angrenzen- den Materialien zugeordnet. Beim Graph-Cut-Verfahren werden Bildinformationen in einen gerichteten Graphen übertragen, wobei die Knoten die Bildpunkte repräsen- tieren. Benachbarte Bildpunkte sind im Graph über eine Kante verbunden, die nach festgelegten Bedingungen, z.B. der Grauwertdifferenz, gewichtet werden. In solchen

Graphen können zu segmentierende Bereiche effizient über zugehörige Suchstrategien identifiziert und getrennt werden (z.B. [BFL06]). Die darauf folgende Triangulierung bei [HSOS10] erfolgt nach einem ähnlichen Prinzip, wie beim Marching Cubes, mittels trilinearer Interpolation gemäß einem festen Schwellwert jeweils für eine Materialgrenze. Die unterschiedlichen Iso-Schwellwerte werden als Mittelwert der beiden angrenzenden Materialgrauwerte angenommen. Dank der Graph-Cut-Unterteilung ist für jeden Voxel bekannt an welche Materialien er angrenzt und somit welcher Iso-Schwellwert zum Einsatz kommt. Stoßen in einem Bereich mehr als zwei Materialien aneinander, wird eine glättende Untertriangulierung eingeführt, sodass keine falschen Spitzen entstehen. In Abbildung 3.19 ist das Ergebnis anhand eines Beispiels dargestellt. Während das Trennen der Materialien durch globale Schwellen zu Fehlbereichen und Schrumpfung führt (Mitte), liefert das vorgestellte Verfahren deutlich bessere Materialgrenzen. In Abbildung 3.20 ist das vollständige Ergebnis der Oberflächenextraktion dieses Beispiels zu sehen.

Weitere Möglichkeiten zur Multi-Material Analyse bestehen in der Klassifikation von Materialbereichen anhand vorkommender Materialübergänge. Hierfür nutzt [SBSG06] sogenannte LH-Histogramme, deren Berechnung bei [PRH09] verbessert wurde. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass jeder Voxel entweder zum Inneren oder zum Rand eines Materials gehört. Im zweidimensionalen LH-Histogramm werden die Wertepaare  $(F_L, F_H)$  aufgetragen, wobei  $F_L$  Werte mit der niedrigeren und  $F_H$  mit der höheren Intensität darstellen.  $(F_L, F_H)$  entsteht durch die gradientenbasierte Analyse der Intensitäten entlang vorkommender Grenzen und bildet somit Häufungen im LH-Histogramm, wenn verschiedene Materialien im Volumen aneinander grenzen. Die Definition derartiger Transferfunktionen findet häufig Anwendung im Bereich der Materialklassifikation. Diese können ein- oder mehrdimensional sein und Funktionspaare bestehend aus Intensitätswerten, Gradienten, Krümmungen oder weiteren Parametern beschreiben. In [PHBG09] werden 2D-Transferfunktionen bestehend aus den ersten beiden statistischen Momenten, dem Mittelwert und der Standardabweichung, bestimmt. Dies geschieht für jeden Voxel in Abhängigkeit des Radius der einbezogenen Nachbarumgebung. Bei steigendem Radius konvergieren Mittelwert und Standardabweichung von Grenzvoxeln gegen die Intensität des Materialübergangs. Bei Betrachtung des gesamten Volumens bilden Materialbereiche Häufungen im aufgespannten Raum aus Mittelwert, Standardabweichung und Radius und lassen sich somit klassifizieren.

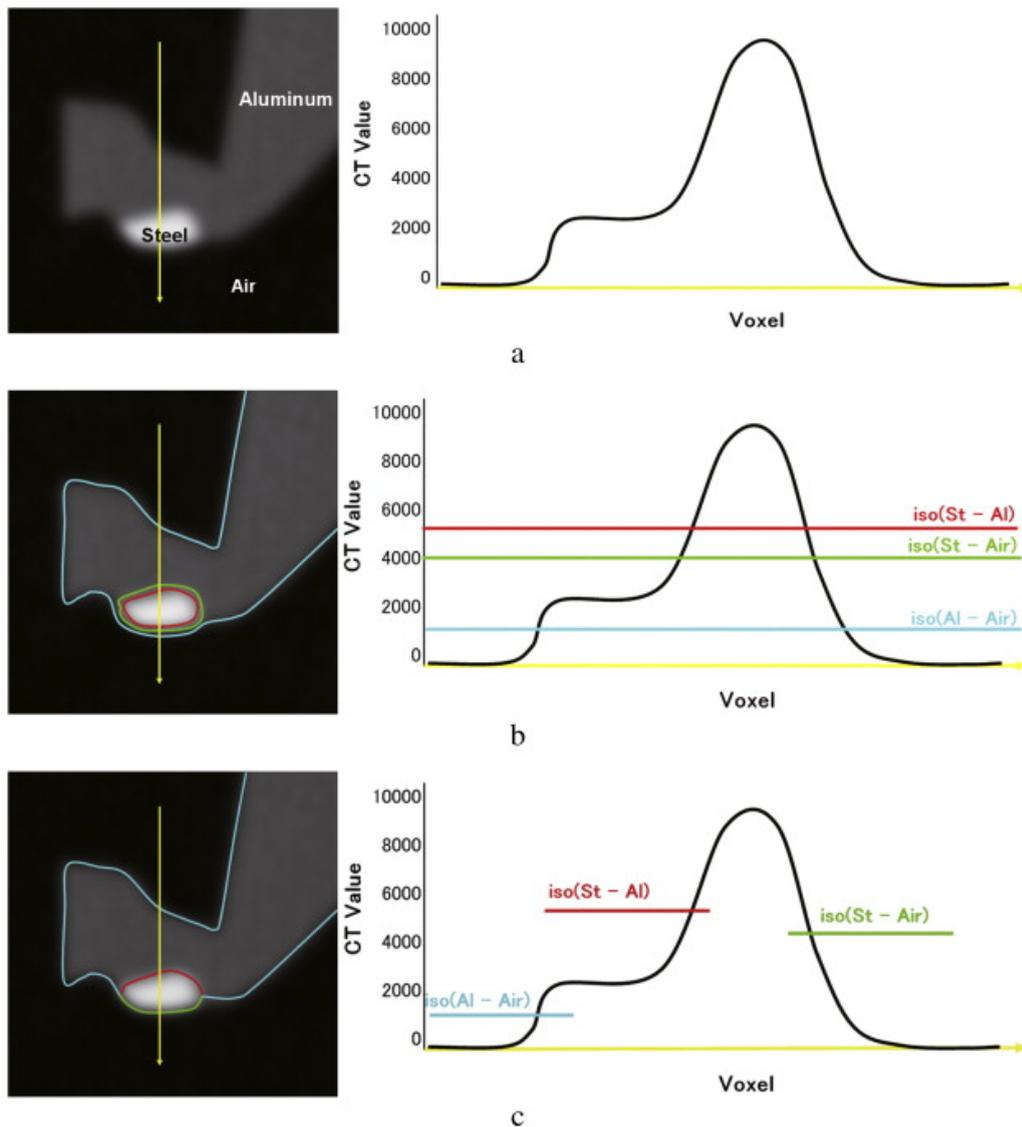


Abbildung 3.19: Multimaterialanalyse nach [HSOS10]: Schnittbild durch ein CT-Volumen mit drei Materialien mit aufgetragenen Grauwerten entlang der dargestellten Linie (oben), fehlerhafte Grenzermittlung mit globalen Schwellwerten (Mitte), Ergebnisgrenzen nach [HSOS10] (unten)

### 3.4 Zusammenfassung und Vorstellung des bestehenden Bedarfs

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Vielzahl geeigneter Verfahren und Ansätze existieren, um Oberflächen für die Auswertung industrieller CT-Daten in einer adäquaten Qualität zu ermitteln. Der etablierte Marching Cubes Algorithmus ist ein genaues, robustes und praktikables Verfahren zur Oberflächenerzeugung und stellt eine gute Basis dar, um Grenzflächen in Volumendatensätzen zu detektieren. Für die industrielle Anwendung ist er in seiner klassischen Form nicht ausreichend und wurde in der Vergangenheit vorwiegend zur Steigerung der Performance und zur Verbesserung der Genauigkeit angepasst und erweitert. Vor allem im Anwendungsbereich

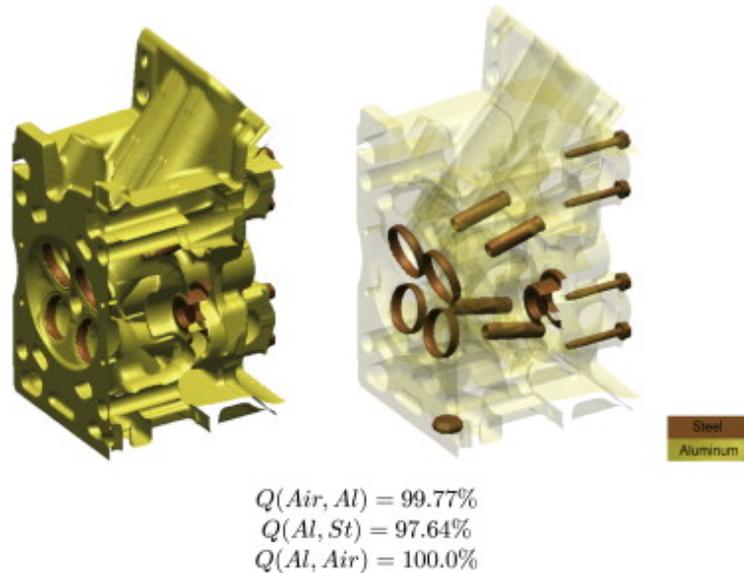


Abbildung 3.20: Vollständig erzeugte Oberflächen eines Motorteils mit getrennten Materialien nach [HSOS10]

der industriellen Messtechnik bedarf es jedoch weiterer Optimierungsschritte, die sich vorwiegend aus der Praxis ergeben, denn während die Computertomographie zunehmend Anwendung in der industriellen Messtechnik findet, steigen ebenso die Anforderungen und die Variation der Bauteile. Die vollständige dreidimensionale Erfassung bzw. Digitalisierung von Bauteilen und die gleichzeitige zerstörungsfreie Prüfung von Material und Messung von Bauteilgeometrien in einer CT-Aufnahme, bietet grundsätzlich viele Möglichkeiten zur Qualitätssicherung. Aus diesem Grund besteht ein Bedarf an präzisen Oberflächenextraktionsverfahren aus Volumendaten, die die Anwendbarkeit für die verschiedensten Bauteiltypen garantieren. Das beinhaltet Bauteile bestehend aus mehreren Materialien oder aus schwer durchstrahlbaren Materialien. Außerdem ist die Untersuchung einzelner Bereiche, z.B. in Abhängigkeit der Position oder des Materials, häufig eine wichtige Fragestellung. Diese sollten als separate Oberflächen erzeugbar sein. Allgemein ist die korrekte Trennung unterschiedlicher Bereich oder Materialien ein wichtiger Aspekt in der praktischen Anwendung der CT in der Industrie, hinter welchem ein großer Bedarf steht. Darüber hinaus existieren keine oder nur wenige Möglichkeiten, die erzeugten Daten zu kontrollieren. Das bedeutet, der Anwender hat bei allen vorgestellten Verfahren keinen Einfluss auf die Anzahl der Punkte oder Dreiecke, folglich auf die Datenmenge. Es besteht ebenso keine Möglichkeit relevante Bereiche zu selektieren und die Punktedichte in Abhängigkeit der Aufgabenstellung zu generieren. Somit ist keine aufgabenangepasste bzw. bereichsabhängige Datengenauigkeit möglich und es sind stets Zusatzschritte zum Erreichen des gewünschten Ergebnisses notwendig. Sowohl die Weiterentwicklungen des Marching Cubes Algorithmus als auch alternative Verfahren decken diese Aspekte zwar teilweise ab, jedoch findet sich keine Methode,

die alle Bedürfnisse einer umfassenden aufgabenbasierten Grenzflächensuche in sich vereint oder sinnvoll kombinieren kann.

Die Notwendigkeit einer aufgabenangepassten Oberflächenerzeugung ist jedoch durch die wachsende Zahl der Applikationen für CT-Daten gegeben. Aus 2.4 ist ersichtlich, dass die Anwendbarkeit der Oberflächendaten mit gängiger Verarbeitungssoftware unumgänglich ist, um moderne Problemstellungen zu lösen. Dazu zählen eine Vielzahl an Programmen zur 3D-Messung, gängige Simulationsprogramme, CAD- und Reverse Engineering-Software, sowie Oberflächenbearbeitungsprogramme. Abgeleitet aus den beschriebenen Mankos und Nachteilen vorhandener Verfahren, ergibt sich folgender bestehender Bedarf und Anforderungen an eine praxisrelevante und optimale Oberflächenerzeugung aus CT-Daten:

- Anwendbarkeit an verschiedensten Bauteiltypen (mehrere Materialien, schwer durchstrahlbare Materialien, unterschiedlich relevante Bereiche),
- Kontrolle über erzeugte Datenmengen und -dichten durch den Nutzer,
- Eingabemöglichkeit relevanter Bereiche,
- Bereichsabhängige Oberflächenerzeugung,
- Auswahl von relevanten Materialien bzw. Materialtrennung,
- Nutzung von Vorwissen über das Bauteil, den CT-Datensatz und die Aufgabe,
- Verarbeitungsmöglichkeit der Oberflächendaten mit gängiger Software (z.B. 3D-Messprogramme, Simulationsprogramme, CAD-Software),
- Optimale Verarbeitungsgeschwindigkeit, Speicherplatzbedarf und Datengenauigkeit.
- Kein Bedarf an manuellen Vor- und Nachbearbeitungsschritten.

Alle aufgeführten Eigenschaften in einem Verfahren zu vereinen, stellt eine Herausforderung dar, die jedoch einen wesentlichen Fortschritt für die Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit der CT im industriellen Einsatz bedeutet.



---

## 4. Konzeption einer aufgabenbasierten Oberflächenextraktion

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Grundlagen der industriellen Computertomographie sowie bekannte Ansätze zur Segmentierung in Bild- und Volumendaten und zur Ermittlung von Oberflächen in CT-Daten beleuchtet wurden, folgt nun die Ableitung eines neuartigen Vorgehens zur Oberflächenextraktion, welches die erkannten Defizite für die praktische Anwendung und Weiterverarbeitung der CT-Volumendaten überwindet. In diesem Kapitel werden dazu zunächst die gegebene Ausgangslage, sowie die sich daraus ergebenden Anforderungen an ein angemessenes Oberflächenextraktionsverfahren aufgezeigt. Basierend auf dem vorgestellten Stand der Technik werden geeignete Ansätze und Vorgehensweisen identifiziert, erweitert oder angepasst und schließlich ein Gesamtablauf entwickelt. Für die einzelnen Teilkomponenten erfolgt in den darauf folgenden Abschnitten eine ausführliche Analyse der möglichen Umsetzungen und eine Auswahl der geeigneten Methoden.

### 4.1 Anforderungsanalyse an ein geeignetes Verfahren

Um ein Verfahren zur optimalen Lösung möglichst vieler Aufgabenstellungen der CT-Datenverarbeitung zu konzipieren, ist es notwendig, die zur Verfügung stehenden Eingangsinformationen sowie die Anforderungen zu analysieren und deren Abhängigkeiten herzuleiten. Daraus ergeben sich Zusammenhänge, welche die zwingenden Eigenschaften eines neuen Verfahrens und die dazugehörigen Arbeitsschritte definieren.

### 4.1.1 Ausgangslage

Zur Ermittlung der notwendigen Eigenschaften eines optimalen Verfahrens zur aufgabenangepassten Bestimmung von Grenzflächen werden zunächst die Gegebenheiten zusammengefasst. Als Eingangsdaten stehen rekonstruierte Volumendaten aus CT-Aufnahmen mit einer gegebenen Voxelgröße und Dimensionen, sowie einer feststehenden Kontrastauflösung zur Verfügung. Der verwendete CT-Aufbau, das Rekonstruktionsverfahren, die Filter, Korrekturen oder Interpolationsschritte, die bereits auf den Datensatz angewandt wurden, spielen für die Qualität mitunter eine wesentliche Rolle. Es handelt sich dabei aber um Wissen, das nicht als bekannt angenommen werden kann. Abhängig davon, wie das zu untersuchende Bauteil aufgenommen wurde, kann der Datensatz durch den Systemaufbau oder Rekonstruktions- und Verarbeitungsschritte bedingte Artefakte, Rauschen, Kantenverschmierung und weitere Auswirkungen in unterschiedlichen Ausprägungen enthalten. Darüber hinaus haben die Einstellparameter der Aufnahme einen großen Einfluss auf die Ergebnisqualität. Je nach Anwender und dessen Erfahrung variiert die Qualität stark, was unterschiedliche Kontrastverhältnisse und -verteilungen im Histogramm zur Folge hat, beispielsweise durch ungeeignete Bauteilaufspannung im CT. Auch diese Informationen stehen für die Datenauswertung nur bedingt zur Verfügung. Schließlich ist der Einfluss des Bauteils selbst auf die Qualität der CT-Daten ein wesentlicher Faktor. Je nach Durchstrahlbarkeit des Materials oder der Materialzusammensetzung sowie der Bauteilgeometrie kommt es wie bereits in Kapitel 2 beschrieben zu unterschiedlichen Artefakten und Kontrasten. Mehrere Materialien in einer Aufnahme führen bei zu großem Dichteunterschied zu einer breiteren Kontrastverteilung oder lassen sich bei kleinem Dichteunterschied nur schlecht auseinander halten. Durch das breite Spektrum der CT-Technologie lässt sich die Auswahl an möglichen Bauteilen kaum einschränken.

Als weitere Eingangsdaten stehen häufig Informationen über das zu untersuchende Bauteil zur Verfügung. Dabei kann es sich um vollständige oder unvollständige dreidimensionale CAD-Modelle handeln, aber auch um technische Zeichnungen. Oft weisen diese zumeist in der konstruktiven Phase der Bauteilentwicklung entstandenen Beschreibungen einige Unterschiede zu der Realität auf. Das können Kleinigkeiten, wie zusätzliche Schriftzüge sein, kann aber soweit führen, dass die 2D- oder 3D-Konstruktionsdaten eher eine grobe Geometriebeschreibung darstellen. Weitere nicht selten zur Verfügung stehende Bauteilinformationen sind Materialien und deren Eigenschaften sowie Details über die Fertigung und die dazugehörigen Fertigungstoleranzen.

Neben den CT-Daten ist natürlich die Aufgabenstellung die wichtigste Eingangsinformation, die anzeigt, was in den CT-Daten relevant ist und in welcher Form die

Ergebnisdaten idealerweise vorliegen sollten. Die Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten lässt sich hier nicht vollständig wiedergeben. Da ein Oberflächenerzeugungsverfahren entwickelt werden soll, ist es sinnvoll, sich auf Aufgaben und Anwendungen mit entsprechenden Defiziten in diesem Bereich zu fokussieren. Wie bereits in 2.4 festgelegt wurde, handelt es sich dabei um die drei Aufgabenklassen: materialbasierte, geometriebasierte oder beliebige Oberflächensegmentierung. Darüber hinaus beinhaltet eine Aufgabenstellung in der Regel Anforderungen an die Auflösung, d.h. im Fall der hier resultierenden Dreiecksnetze die Punktedichte und -anzahl. Diese Forderungen können sowohl aus der Aufgabe selbst kommen als auch sich durch Speicher- und Datenverarbeitungsrestriktionen der Weiterverarbeitungsumgebung ergeben. Diese Einschränkungen müssen folglich vorab bekannt sein. Bei messtechnischen Auswertungen sind zudem Toleranzen anzugeben, um eine Bewertung der resultierenden Oberflächen zu ermöglichen. Hierzu ist außerdem die Angabe der Messunsicherheit (siehe 6.1.1) bei den Ergebnissen notwendig. Eine Auflistung aller relevanten und möglichen Eingabeinformationen für eine aufgabenangepasste Oberflächenbestimmung ist in Tabelle 4.1 in der linken Spalte zu finden.

Nicht alle Aufgabenstellungen können mit der CT-Technik oder mit dem gegebenen CT-Datensatz gelöst werden. Beispielsweise beschränkt die Strukturauflösung der CT-Daten den Detailgrad der Ergebnisnetze oder die Stärke der Artefakte lässt keine Grenzfläche erkennen und damit auch keine korrekte Oberflächenermittlung zu. Diese Fakten können auch durch einen neuen Ansatz nicht verändert werden, sodass im Folgenden davon ausgegangen wird, dass es sich um lösbare Problemstellungen und um CT-Aufnahmen mit ausreichender Qualität handelt, wenn nicht ausdrücklich anders erwähnt.

### 4.1.2 Anforderungen

Nachdem die Ausgangslage identifiziert wurde, müssen nun die Anforderungen an ein optimales Oberflächenerzeugungsverfahren ermittelt werden. Die beschriebenen Gegebenheiten legen nahe, dass CT-Daten aller Art unabhängig von Aufnahmebedingung, Ergebnisdaten oder Bauteil verarbeitbar sein müssen und dass als Ergebnisdaten Dreiecksnetze entstehen sollen. Darüber hinaus erfordert, wie in Kapitel 3 beschrieben, jede Ermittlung von Grenzflächen oder Segmentierung von Bereichen gewisse Entscheidungskriterien zur Unterscheidung des Objektinnern und -äußeren. Aus den in Abschnitt 3.2 erläuterten Gründen eignet sich der globale Schwellwert wie beim Marching Cubes Algorithmus nur bedingt. Ein lokales Vorgehen ist dann unumgänglich, wenn nicht mehr nur der stärkste Grauwertübergang in einem Datensatz betrachtet werden soll. Außerdem steht oft, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, eine große Menge an Wissen über die verschiedenen Schritte während der Entstehung und Weiterverarbeitung der CT-Daten zur Verfügung. Dieses Wissen

kann herangezogen werden, um lokal Grenzen zu bestimmen. Dazu ist es notwendig, dass jegliche Art von Vorwissen in das Verfahren eingeht und als Soll-Kriterium eine Basis für Grenzpunktermittlung darstellt. Da nicht immer dieselben Kriterien bei einer Aufgabe von Bedeutung oder überhaupt gegeben sind, muss diese Basis entsprechend adaptiv sein und auf die verschiedenen Randbedingungen angemessen reagieren. Übertragen auf die Gegebenheiten bedeutet dies für ein aufgabenangepasstes Oberflächenextraktionsverfahren, dass die manuelle Eingabe von Vorwissen in Form von gesuchten Bereichen, geometrischen Eigenschaften (Regelgeometrien, Krümmungen oder sonstige geometrische Beschreibungen), Materialien (bzw. gesuchte Grauwertbereiche) oder Materialübergänge notwendig ist. In einigen Fällen kann auch eine automatische Generierung von Vorwissen sinnvoll sein, wenn dies aus bestehenden Informationen ermittelt werden kann. Beispielsweise können geometrische Eigenschaften in CAD-Daten bestimmt und entsprechende Bereiche als Region-of-Interest (ROI) für gesuchte Oberflächen festgelegt werden.

Außerdem ergibt sich eine weitere Anforderung durch eventuelle Einschränkungen der Datenstruktur, -auflösung oder -menge. Ein optimales Verfahren sollte idealerweise direkt ein Ergebnisnetz liefern, das in Form, Punktverteilung und -dichte die gewünschten Zieleigenschaften besitzt und keine weiteren Nachbearbeitungsschritte benötigt. Dazu bedarf es wiederum einer manuellen Eingabemöglichkeit zur Definition dieser Parameter, die in irgendeiner Form in die Netzerstellung einfließen müssen.

Schließlich muss das Verfahren messtechnischen Ansprüchen bezüglich der Bewertbarkeit von Messergebnissen gerecht werden. Im Gegensatz zu medizinischer Oberflächenbestimmung oder medizinischen 3D-Segmentierungsverfahren spielt hier die Genauigkeit bzw. Messunsicherheit die Hauptrolle und hat bei der Bestimmung der Positionen der Oberflächenpunkte oberste Priorität.

In Tabelle 4.1 sind diese Anforderungen in der mittleren Spalte aufgezählt und direkt mit der dazugehörigen Eingabeinformation verknüpft, sodass der Zusammenhang zwischen möglichen Eingangsdaten oder -informationen und den daraus resultierenden Bedingungen an ein neuartiges aufgabenangepasstes Verfahren zur Oberflächenermittlung in CT-Daten verdeutlicht wird.

### 4.1.3 Fazit für geeignetes Verfahrenskonzept

Die zusammengetragenen Einflüsse und Anforderungen an ein neues Verfahren führen leicht zu dem Schluss, dass sich bekannte und gängige Verfahren sowie vorgestellte Forschungsansätze nicht eignen. Einzelne Teilanforderungen werden zwar abgedeckt und bieten interessante Lösungsansätze, jedoch erfüllt kein Ansatz das gesamte Spektrum an Flexibilität, das hier gefordert ist. Aus diesem Grund ist eine

grundsätzliche Analyse der Segmentierung und Kantenfindungsverfahren notwendig. Das bedeutet, die Herangehensweise muss aufbauend auf den ermittelten Eigenschaften grundlegend ermittelt werden. Dazu sind in der folgenden Tabelle 4.1 die Ausgangssituation und die sich daraus ergebenden Anforderungen für die vorgestellten Segmentierungsansätze (pixel-, kanten-, regionen- und modellbasierte Verfahren) bewertet und gegebenenfalls erläutert. Die präsentierten modellbasierten Verfahren werden hier zusätzlich unterschieden mit Ausnahme der PDM. Denn obwohl es sich hierbei um ein sehr mächtiges Verfahren handelt, ist es eine trainierte Methode, die auf eine spezielle Problemstellung angepasst werden muss. Da jedoch möglichst viele und unterschiedliche Daten und Aufgaben abgebildet werden sollen, widerspricht dies den grundlegenden Anforderungen. Die Idee der deformierbaren Modelle ist aber vielversprechend und mit den Snakes und Level Sets ausreichend vertreten. Wie bereits erwähnt, werden die Segmentierungsansätze vor allem im Hinblick auf die Findung ihrer Grenzen betrachtet und sind an einigen Stellen über ihre Definition hinausgehend bewertet. So zeigt der Marching Cubes Algorithmus beispielsweise wie man ausgehend von einem pixelbasiertem Ansatz mit einem Zusatzschritt sub-voxelgenau interpolieren kann.

Die Tabelle zeigt eine klare Tendenz. Die pixel- und kantenbasierten Ansätze eignen sich zwar sehr gut für spezielle Gegebenheiten und sind einfach umsetzbar, zeigen aber nicht die hier benötigte Flexibilität. Regionenbasierte Verfahren ermöglichen durch die Angabe eines Startwerts zwar in eingeschränkter Weise die Eingabe von Vorwissen über gesuchte Grauwertbereiche, aber keine Miteinbeziehung von bildexternem Wissen, wie Geometrieinformationen oder Vordefinition der Ergebnisnetzstruktur. Die modellbasierten Ansätze zeigen unterschiedliches Potential. Die Hough-Transformation ermöglicht zwar eine modellbasierte Geometriesuche, eignet sich aber nur für spezielle einfache Geometrien, da besonders im 3D der Suchraum zu groß und eine Umsetzung somit zu aufwendig ist. Außerdem ist sie durch die Bestimmung der geometrischen Parameter eher zur groben Geometriefindung geeignet, könnte sich aber prinzipiell um ein deformierbares Modell erweitern lassen. Das eindeutige Ergebnis der Anforderungsanalyse weist jedoch auf die vielversprechenden Verfahren der Aktiven Konturen oder Snakes sowie der Level Sets. Sie haben zwei entscheidende Vorteile. Zum Ersten werden sie mit einem beliebigen Dreiecksnetz initialisiert. Dieses Netz kann also derartig generiert werden, dass es von vornherein den Anforderungen bezüglich Struktur, Punktverteilung und -dichte entspricht. Außerdem kann es an einer wählbaren Position im Datensatz platziert werden und schränkt auf diese Weise den Bereich ein. Zum Zweiten erlauben sowohl die Energiefunktionen der Snakes als auch die Geschwindigkeitsfunktionen der Level Sets alle möglichen Eingaben von Vorwissen. Dabei kann es sich um Informationen aus dem Volumendatensatz oder um konturbezogene Merkmale handeln. Damit stellen beide

Eingabe	Anforderung	Pixel	Kanten	Regionen	Modell		
					Hough	Snakes	Level Set
3D Volumendaten aus CT	Verarbeitung beliebiger Volumendaten	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Beliebige Datenqualität u. Aufgaben	lokal adaptives Verfahren		✓	✓	✓	✓	✓
Gesuchte bzw. geforderte Bereiche	Vorgabe ROI			(✓)**		✓	✓
Gesuchte Geometrie	Eingabe Geometrieinformationen und mögliche Geometrieanalyse				(✓)**	✓	✓
Gesuchtes Material	Eingabe Material bzw. Grauwertbereich			✓		✓	✓
Gesuchter Materialübergang	Eingabe Materialien bzw. Grauwertübergang					✓	✓
Geforderte Punktedichte	Eingabe Punktedichte, in einem Datensatz variierbar				✓	✓	✓
Einschränkung Datenmenge	Eingabe Grenze Datenmenge				✓	✓	✓
Geforderter Detailgrad	Subvoxelgenaue Positionsberechnung	(✓)*		(✓)*		(✓)*	(✓)*

(✓)\* Mit zusätzlichem Interpolationsschritt möglich

(✓)\*\* nur eingeschränkt möglich

Tabelle 4.1: Anforderungsanalyse für bekannte Segmentierungsansätze

Verfahren eine gute Ausgangsbasis für ein optimales aufgabenangepasstes Extraktionsverfahren dar. Bei den beiden ursprünglichen Verfahrensbeschreibungen handelt es sich zwar um stetige Funktionen, aber für die Anwendung im diskreten Fall ist eine zusätzliche Interpolation zum Erreichen einer Subvoxelgenauigkeit notwendig, ähnlich wie beim Marching Cubes Algorithmus. Beim Vergleich beider Verfahren ist zu erkennen, dass sie sich nur geringfügig unterscheiden. Der Hauptunterschied liegt, wie bereits in 3.1.5.4 erwähnt, in der Topologie und Beschreibung der Kontur. Jedoch existieren Varianten der Snakes, die zu ähnlichen Ergebnissen führen, siehe 3.1.5.3. Im Rahmen der hier ermittelten Anforderungen ist zudem nicht davon auszugehen, dass eine hohe Flexibilität der Konturen notwendig sein wird, da durch die gegebenen Aufgabenstellungen bereits eine nahe liegende Beschreibung vorliegen sollte. Unabhängig hiervon beinhalten die Entwicklung und die weiterführenden Arbeiten der Level Sets eine Vielzahl interessanter Ansätze, die durchaus Anwendung in dem hier zu realisierenden Vorgehen finden können und in die Konzeption miteinbezogen werden.

Zusammenfassend wurden, basierend auf einer Anforderungsanalyse und in Abwägung der Vor- und Nachteile, die Aktiven Konturen bzw. Snakes als geeignete Grundlage für ein aufgabenangepasstes Oberflächenextraktionsverfahren identifiziert. Dieses Vorgehen wird demnach den folgenden Entwicklungen als Vorbild dienen, wobei alle relevanten Weiterentwicklungen der Snakes, Level Sets und Erkenntnisse aus bekannten Verfahren der 3D-Grenzflächenermittlung in CT-Volumendaten Berücksichtigung finden.

## 4.2 Entwurf des Gesamtablaufs

Zur vollständigen Konzeption des Verfahrensansatzes wird zunächst der Gesamtprozess entworfen. Im nächsten Schritt werden die Anforderungen und Möglichkeiten der einzelnen Teilschritte im Detail beschrieben und analysiert. Die genaue Betrachtung der Arbeitsschritte erfolgt in den nachstehenden Abschnitten. Der geplante Gesamtprozess ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Zuerst wird eine Initialoberfläche benötigt, die vom Nutzer definiert werden muss. Sie soll eine beliebige Ausprägung besitzen können. Das bedeutet an dieser Stelle, dass festgelegt wird, in welcher Weise das Bauteil geometrisch interessant ist, also bestimmte Geometrien, Krümmungsbereiche usw. Dies ist die Ausgangsbasis für das initiale Dreiecksnetz und kann beispielsweise manuell erfolgen durch die Erstellung eines 3D-Netzes mit entsprechenden Tools oder 3D-Programmierbibliotheken, z.B. OpenGL [Opeb] oder POV-Ray [Pov]. Weitere Möglichkeiten zur initialen Flächenbestimmung bestehen durch die Festlegung von geometrischen Objekten, z.B. einer Kugel, oder mit Hilfe des CAD-Modells des zu untersuchenden Objekts. Im nächsten Schritt kann Vorwissen über das Objekt

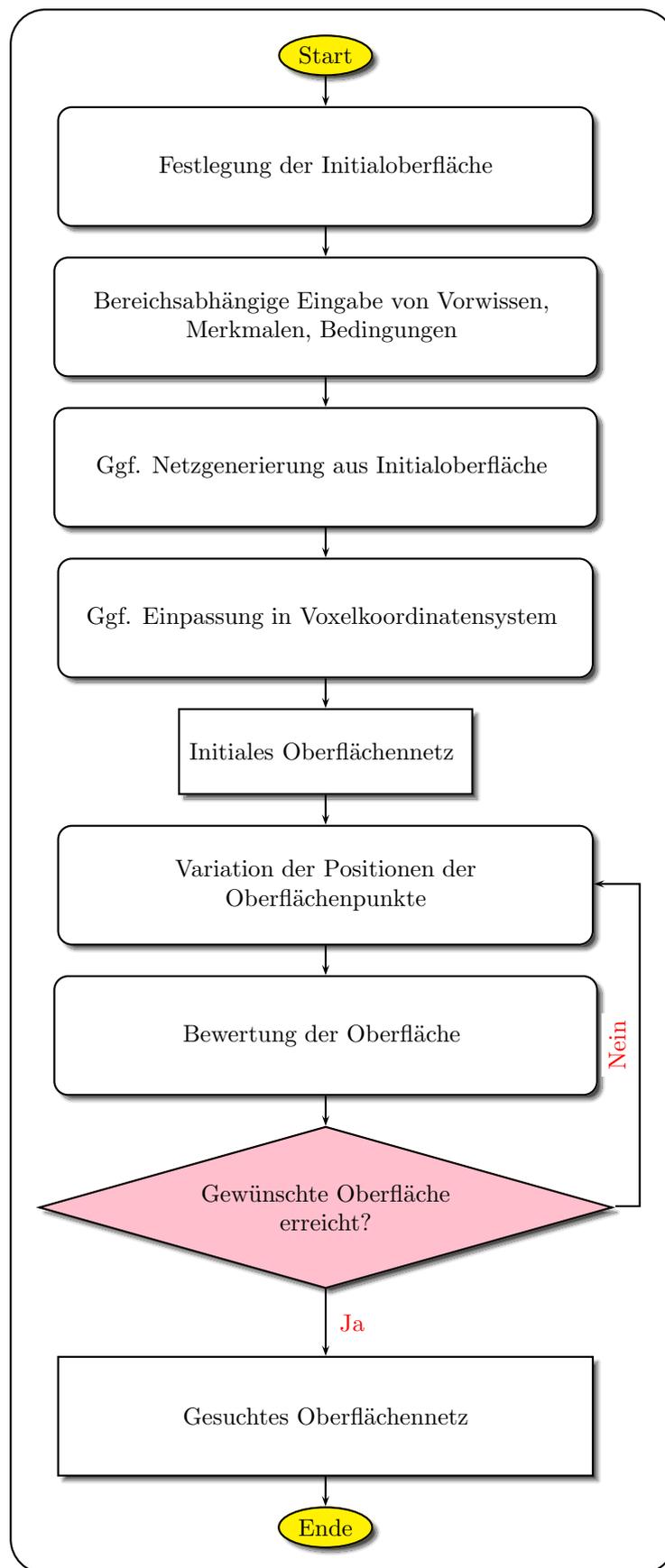


Abbildung 4.1: Ablaufdiagramm der aufgabenbasierten Oberflächenextraktion

selbst, wieder in beliebiger Ausprägung, separat für einzelne oder für alle Bereiche angegeben werden. Dies sind Merkmale wie Materialeigenschaften, erwartete Grauwerte oder Gradienten an Materialübergängen und erwartete lokale Krümmungen der Oberfläche sowie Zieleigenschaften und Anforderungen an das Ergebnis. Diese Angaben sind optional und müssen nicht vollständig vorhanden sein. Das so beschriebene Ausgangsmodell muss aus den gegebenen Modelldaten, sofern es noch nicht bereits in dieser Form vorliegt, mit entsprechenden Algorithmen in eine diskrete Topologie, z.B. ein Dreiecksnetz, überführt werden. Dazu wird das gegebene Vorwissen zum einen über das Objekt und zum anderen über die benötigten Eigenschaften des Ergebnisnetzes eingearbeitet. Das bedeutet, dass die Auflösung des Netzes, also die Punktedichte, für einzelne Bereiche separat oder für das gesamte Objekt festgelegt werden kann, je nach Bedarf für die spätere Nutzung und ausschließlich für die benötigten Bereiche des Bauteils. Es wird folglich kontrolliert ein Dreiecksnetz erzeugt, welches den Anforderungen der jeweiligen Aufgabe entspricht. Ist beispielsweise nur das Innere eines Bauteils für Simulationen oder Messungen relevant, müssen nur diese Bereiche für die Oberflächenextraktion ausgewählt werden. Die initiale Oberfläche und Startkontur ist damit festgelegt und muss im Koordinatensystem des Voxeldatensatzes vorliegen oder in dieses überführt werden. Im nächsten Schritt beginnt die Variation der Oberflächenpunkte, d.h. die Knoten des Netzes werden räumlich in ihren Positionen verändert. Für die verschiedenen Positionen eines Knotens erfolgt eine Bewertung. Diese setzt sich zusammen aus Informationen des Voxelvolumens, die mit dem Punkt korrespondieren, und Informationen aus dem Oberflächennetz selbst. Diese Informationen entsprechen den zuvor festgelegten Bedingungen und Erwartungen an die Oberfläche, z.B. der erwartete Grauwert oder Gradient und bzw. oder eine maximal erlaubte Krümmung an der Oberfläche des jeweiligen Punkts. Für die verschiedenen Positionen der Punkte und die damit einhergehende Netzform wird ermittelt, wie gut der aktuelle Zustand den Erwartungen bezüglich der genannten Kriterien entspricht. Die Bewertung kann global für die gesamte Oberfläche oder lokal in den einzelnen Punkten durchgeführt werden und wird für das gesamte Netz zusammengefasst. Dieser Schritt wird iterativ durch weitere Variation der Positionen wiederholt, bis das Ergebnis der Bewertung optimal ist bzw. einem festgelegten Abbruchkriterium genügt. Bei dieser Bewertung handelt es sich um die Energiefunktionen der Verfahren der Aktiven Konturen, welche iterativ minimiert werden, bis ein globales Minimum für die Bedingungen an die Oberfläche erreicht ist. Als Ergebnis erhält man direkt eine bezüglich der Aufgabenanforderungen geeignete Oberfläche.

Dieser grobe Ablauf orientiert sich am Vorgehen der Aktiven Konturen. Einige Details sind hier noch nicht explizit aufgeführt. Dazu zählt die subvoxelgenaue Auflösung des Verfahrens. Diese kann sich entweder direkt in der Positionsvariation

wiederfinden oder als zusätzlicher Schritt nach der Bestimmung der voxelgenauen Punkte erfolgen. Ebenso sind eventuell Maßnahmen zur Datenglättung sinnvoll, welche direkt in die Energiefunktionen integriert sein können oder in Form richtungsweisender Faktoren eingebaut werden, ähnlich zu den Level Sets. Ungeachtet der Reihenfolge im Ablaufdiagramm 4.1 werden die einzelnen Arbeiten thematisch in folgende Pakete eingeordnet:

- **Initialoberfläche** geometrisch und topologisch, z.B. bereichs- und geometrieabhängige Auswahl, Triangulierung und Positionierung.
- Initialisierung mit **Vorwissen**, z.B. Eingabe- oder Auswahlmöglichkeiten sowie Analyse der Eignung der Art der Information,
- **Energiefunktionen**, z.B. Form und Normierung,
- **Positionsvariation** und **Bewertung**, z.B. Variationsrichtung, globale oder lokale Bewertung, Abbruchkriterien.
- **Interpolationsmöglichkeiten** für Subvoxelgenauigkeit, z.B. Grauwertinterpolation oder geometrische Verfahren,
- **Implementierung**, z.B. Restriktionen, Rechenzeitoptimierung.

In den nachfolgenden Abschnitten werden diese Unterthemen beleuchtet und bezüglich ihrer Möglichkeiten, Grenzen und Einschränkungen bewertet. Dies geschieht stets mit dem Fokus auf die spätere Implementierung sowie die praktische Umsetzbarkeit und vor allem Anwendbarkeit für reale Aufgabenstellungen der CT-Datenauswertung.

### 4.3 Erzeugung der Initialoberfläche

Die initiale Oberfläche stellt für das hier vorgeschlagene Verfahren die wichtigste Grundlage dar, da ihre geeignete Erzeugung bereits eine Vielzahl der Anforderungen abdeckt. Schon an dieser Stelle werden einerseits die relevanten Regionen, die ROI, sowie die geeignete Struktur für die Ergebnisdaten festgelegt. Andererseits ergeben sich hier auch Grenzen der erreichbaren Auflösungen, die für den gesamten Ablauf von Bedeutung sind. In diesem Abschnitt sollen sowohl die theoretischen Möglichkeiten der Eingabe von Bereichen, Sollstrukturen und geometrischen Vorgaben, die notwendigen Randbedingungen und Zusatzschritte als auch eine entsprechende Bewertung für die Praxistauglichkeit aufgezeigt werden. An den jeweiligen Stellen wird unterschieden, in welchen Daten die Auswahl stattfinden kann oder muss, also in Volumendaten oder Oberflächendaten bzw. -modellen. Der Koordinatenabgleich und

die Diskretisierung sind Schritte, die nicht für alle Initialisierungsvarianten notwendig sind. Deshalb werden sie nach den Möglichkeiten der Bereichsfestlegung erläutert und ihre Notwendigkeit für die entsprechenden Verfahren nachträglich erwähnt.

### 4.3.1 Manuelle Bereichsfestlegung

Die einfachste Variante der Auswahl einer ROI ist die manuelle Eingabe der Grenzen eines Bereichs. Dies kann entweder in den Volumendaten erfolgen oder anhand einer zur Verfügung stehenden Oberflächenrepräsentation. Dabei kann es sich um ein 3D-Modell, üblicherweise ein CAD-Modell, oder um eine anderweitig bestimmte Grenzfläche oder -punktvolke handeln, z.B. erzeugt mit einem globalen Schwellwert. Eine manuelle Auswahl wird von vielen gängigen Softwaretools der 3D-Datenverarbeitung für die verschiedensten Anwendungen, z.B. Datenbeschneidung, unterstützt. Zumeist werden die Grenzen als Polygonzüge in einer Projektionsrichtung eingegeben und lassen sich oft weiter in der übrigen Dimension bearbeiten. In Abbildung 4.2 sind Beispiele für manuelle Auswahl in Volumen- und Oberflächendaten zu sehen. Diese

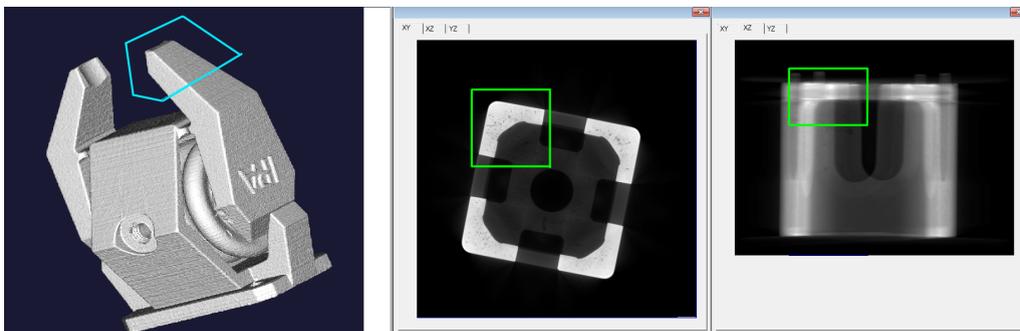


Abbildung 4.2: Beispiele für manuelle ROI-Eingabe: Polygonzug bei STL-Viewer (links), Auswahl über Box aus verschiedenen, aber festen Ansichten (rechts)

Art der Bereichsauswahl ist zwar intuitiv und einfach umsetzbar, beinhaltet aber besonders für die vorliegende Problemstellung einige Nachteile. Zunächst ist sie grob und das Auswählen bzw. Herausschneiden komplexerer Bereiche ist nur schwer oder gar nicht möglich. Gerade in den Volumendaten ist es selbst für den geübten Nutzer nicht einfach, sich über die sichtbaren Schichten hinaus zu orientieren. Da helfen 3D-Volumenrender oder die genannten Oberflächenmodelle weiter. Aber auch hier ist die Sichtbarkeit und Separierbarkeit beispielsweise von inneren Strukturen nicht ohne Weiteres gegeben. Zudem können Ränder und Kanten des Bauteils nicht als Grenzen identifiziert werden, da keine direkte geometrische Zuordnung gegeben ist.

### 4.3.2 Grauwertbasierte Bereichsfestlegung

Stehen Informationen über gesuchte Bereiche bezüglich der Grauwertinformation zur Verfügung, lässt sich durch bekannte Methoden eine automatische oder halbautomatische Suche der ROI direkt in den Volumendaten durchführen. Ist beispielsweise

ein bestimmtes Material gesucht, lässt sich mit gegebenem Startpunkt schnell ein Regiongrowing umsetzen. Bestimmte Materialübergänge können ebenfalls auf diese Weise oder mittels anderer herkömmlicher Verfahren, wie Kantenfilter, ermittelt werden. Wie bei der manuellen Auswahl ist auch hier keine direkte Zuordnung zu einer geometrischen Beschreibung vorhanden, sodass dieses Vorgehen entsprechende Aufgabenstellungen nicht erfüllen könnte. Jedoch liefert eine grauwert- bzw. gradientenbasierte Klassifikation von Bereichen eine wichtige Information, die Relevanz für viele Anwendungen hat.

### 4.3.3 Krümmungsbasierte Bereichsfestlegung

Bereiche mit bestimmten Krümmungen können aus verschiedenen Gründen für eine Auswertung interessant sein. Zum einen liefern sie eine Aussage über die passenden Geometrien und zum anderen zeigen sie Ähnlichkeiten von Gebieten an. Das heißt, sie eignen sich als Grundlage zur Bewertung von Zusammenhängen zwischen Nachbarpunkten oder Gebieten. Für eine derartige Auswertung muss eine Oberflächenrepräsentation zur Verfügung stehen. Die Grauwertinformationen des Volumenmodells werden nicht benötigt. Es existieren verschiedene Verfahren zur Krümmungsanalyse. Ein automatisierter Ansatz für Punktdaten ist in [ESW06] und in [EKV08] vorgestellt. Hier wird zunächst für jeden Punkt eine Krümmung berechnet. Dann erfolgt eine schwellwertbasierte Unterteilung in Bereiche kleiner und Bereiche großer Krümmung. Dies ist darauf begründet, dass es sich bei Bereichen großer Krümmung in Bauteilen um Kanten handelt, die konstruktive Elemente voneinander trennen. Zusammenhängende Gebiete kleiner Krümmung sind demnach häufig geometrische Einzelelemente. In Abbildung 4.3 sind die Ergebnisse dieses Verfahrens demonstriert. Diese Form der Bereichsfestlegung liefert zwar krümmungsbasierte Zusammenhänge

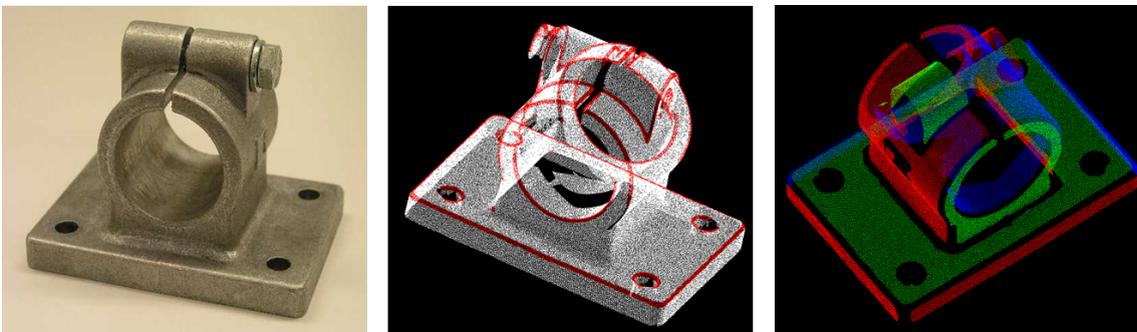


Abbildung 4.3: Krümmungsbasierte Bereichssegmentierung: Aluminiumgussbauteil (links), Punktwolke unterteilt in Bereiche mit geringer Krümmung (weiß) und mit hoher Krümmung (rot)(Mitte), zusammenhängende Bereiche mit geringer Krümmung (rechts) [EKV08]

für die Initialisierung und kann über Abgleich der Koordinatensysteme in räumlichen Zusammenhang mit den Voxeldaten gebracht werden, um zusätzlich Grau-

wertinformation zu berücksichtigen. Damit ist aber keine direkte Beschreibung von geometrischen Strukturen vorhanden.

#### 4.3.4 Modellbasierte Bereichsfestlegung

Für eine modellbasierte Eingabe der ROI ist eine parametrische oder implizite Beschreibung der gesuchten Geometrie notwendig. Ist ein CAD-Modell gegeben, das mindestens in grober Form die gesuchten Bereiche beinhaltet, ist eine Eingabe leicht über das Markieren einzelner Flächen oder Flächenteile möglich. Häufig spricht man bei diesen Einzelsegmenten von *Patches*. In Abbildung 4.4 ist eine beispielhafte Patchauswahl mit resultierender, hier bereits triangulierter Oberfläche zu sehen. Idealerweise ist das vollständige CAD-Modell vorhanden. Prinzipiell ist aber ledig-

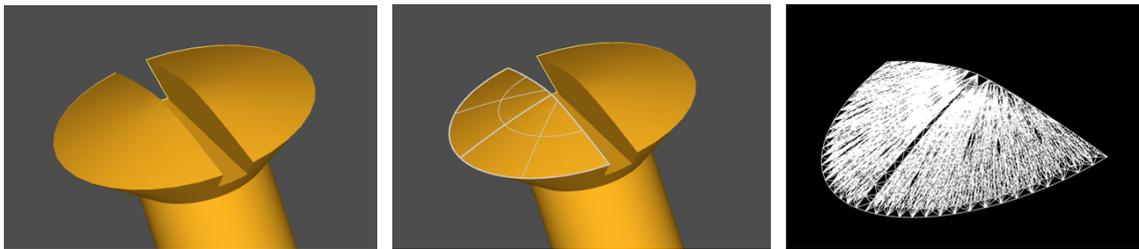


Abbildung 4.4: Modellbasierte Bereichsfestlegung: CAD-Modell einer Schraube (links), ausgewähltes Patch hervorgehoben (Mitte), extrahierte Oberfläche der ROI (rechts)

lich die Repräsentation der gesuchten Geometrien notwendig. Der Vorteil hier ist, dass diese leicht erzeugt werden können, auch wenn kein CAD-Modell gegeben ist. Das Wissen, welche Geometrien im Bauteil vorkommen, kann entweder vom Anwender kommen oder teilweise automatisch erfolgen. Hierzu wird erneut eine Oberflächenbeschreibung des Bauteils benötigt, in welcher z.B. bei [Ahn04] automatisch 3D-Regelgeometrien gesucht und eingepasst werden. Dieses Vorgehen kann ebenso auf die krümmungssegmentierten Bereiche aus 4.3.3 angewandt werden, da davon ausgegangen werden kann, dass sich Regelgeometrien in Bereichen kleiner Krümmung zusammenfinden. Eine halbautomatisierte Variante existiert in der Auswahl eines Startpunkts zur Definition der gesuchten Bereiche. Die parametrische Repräsentation der Geometriebereiche steht danach direkt zur Verfügung. In Abbildung 4.5 ist zunächst ein Beispiel für die einfache Regelgeometrieauswahl dargestellt. In diesem Bauteil sind in der ersten Anwendung nur die inneren Zylinderformen von Interesse. Diese können leicht durch Angabe eines Startpunkts oder durch automatische Zylindersuche im gesamten Datensatz ermittelt werden. In Abbildung 4.6 ist die Weiterführung der vorab vorgestellten krümmungsbasierten Bereichssegmentierung dargestellt. Die erkannten zusammenhängenden Gebiete wurden als Grundlage für die Einpassung von Regelgeometrien angenommen, siehe erneut [ESW06].

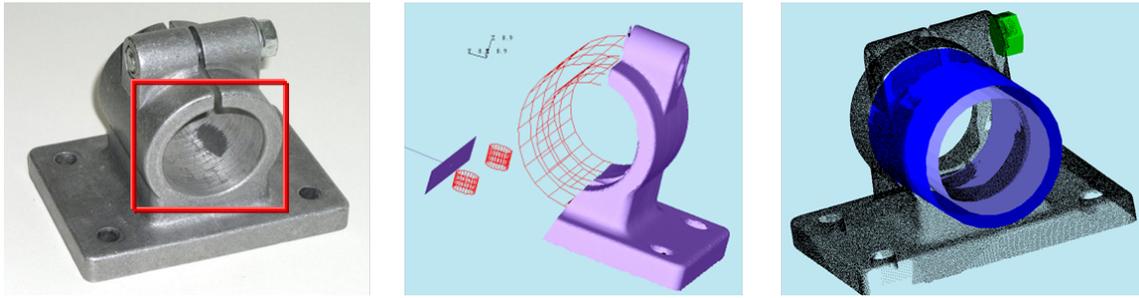


Abbildung 4.5: Bestimmung von Regelgeometrien: Aluminiumgussbauteil (links), beispielhafte Darstellung vorhandener Regelgeometrien (Mitte), ermittelte Zylinderformen nach [Ahn04] (rechts)

Als Ergebnis entsteht eine angemessene parametrische Flächenrückführung, die im folgenden Schritt der Bereichsauswahl analog zum CAD-Modell behandelt werden kann. Neben Regelgeometrien können auch Freiformflächen in einem Bauteil vorhan-

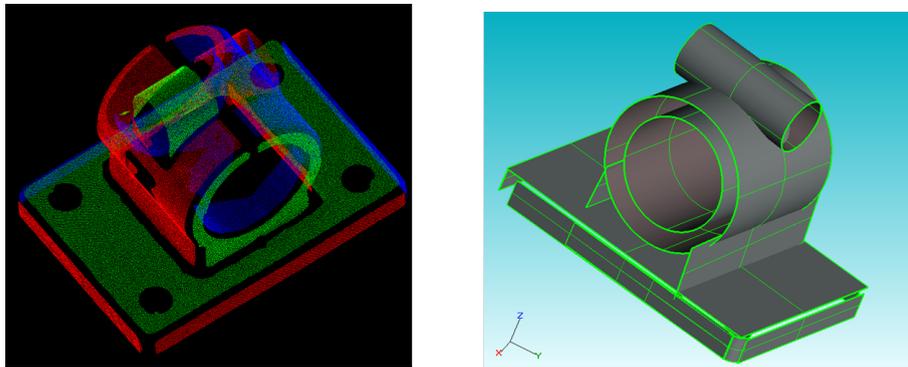


Abbildung 4.6: Vorsegmentierte Krümmungsbereiche (links), dazugehörige ermittelte Regelgeometrien (rechts)

den sein. Die gängige parametrische Beschreibung von Freiformflächen sind NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Diese werden von einer Vielzahl kommerzieller Softwareprodukte zur Flächenrückführung angeboten und erlauben eine Splinerekonstruktion von Punkt- oder Dreiecksnetzdaten. An dieser Stelle wird auf entsprechende, weiterführende Literatur für das umfangreiche Thema der Flächenrückführung verwiesen. Zusammenfassend ist es mit oder ohne Vorgabe von CAD-Modellen möglich, auf Basis gegebener Oberflächeninformation modellbasiert Bereiche auszuwählen. Dieses Vorgehen hat für die praktische Anwendung den Vorteil, dass es sowohl intuitiv ist als auch eine gute Initialisierung liefert. Auf Basis von derartigen Modellen ist zum einen die notwendige Geometrieinformation vorhanden und zum anderen lässt sich leicht Einfluss auf die Überführung in eine topologische Beschreibung entsprechend der gewünschten Zieleigenschaften des Ergebnisses nehmen, später beschrieben in 4.3.6.

### 4.3.5 Transformation der Koordinatensysteme

Die Nutzung von externen Modellen oder Oberflächendaten bedarf immer einer Transformation und Anpassung der verschiedenen Koordinatensysteme der Volumen- und Oberflächendaten, sodass sie im selben Bezugssystem vorliegen. In dem hier vorgestellten Ansatz ist jedoch keine exakte Bestimmung der Transformation notwendig, da es sich um eine Initialisierung handelt, die in späteren Schritten angepasst wird. Allerdings ist davon auszugehen, dass eine größere Übereinstimmung der Positionen vor allem in Randbereichen zu besseren Ergebnissen und kürzeren Laufzeiten durch kleinere Suchbereiche führt. Grundsätzlich ist jedoch eine geeignete Grobausrichtung ausreichend. Diese kann auf Basis einer Hauptkomponentenanalyse und bzw. oder der Betrachtung der kleinsten einschließenden Box (*Bounding Box*) erfolgen. Um eine genauere Ausrichtung zu erhalten, kommen in der Praxis nach einem solchen groben Abgleich häufig Best-Fit-Verfahren nach Gauß zum Einsatz. Diese basieren auf dem Prinzip der Minimierung der quadratischen Abstände zwischen zwei Oberflächen, also der Methode der kleinsten Quadrate, u.a. zu finden bei [Str11]. Auf diese Weise lassen sich ebenso die bereits erwähnten Regelgeometrien in Oberflächendaten einpassen. Als Ergebnis erhält man hiermit das geometrische Ausgleichselement der als zugehörig definierten Punkte. Dieses Verfahren ist zwar stark abhängig von der Ausgangslage beider Oberflächen zueinander und reagiert auf Ausreißer, liefert aber für die vorliegende Anwendung ausreichend exakte Ergebnisse. Präzisere und robustere Verfahren, wie die Approximation nach Tschebyscheff, siehe u.a. [Sch98], sind nicht notwendig. In Abbildung 4.7 ist ein typisches Beispiel für die Verwendung von Best-Fit-Verfahren zu sehen, zur Einpassung eines CAD-Modells mit einer Messpunktwolke zur farbkodierten Abweichungsdarstellung im Soll-Ist-Vergleich.

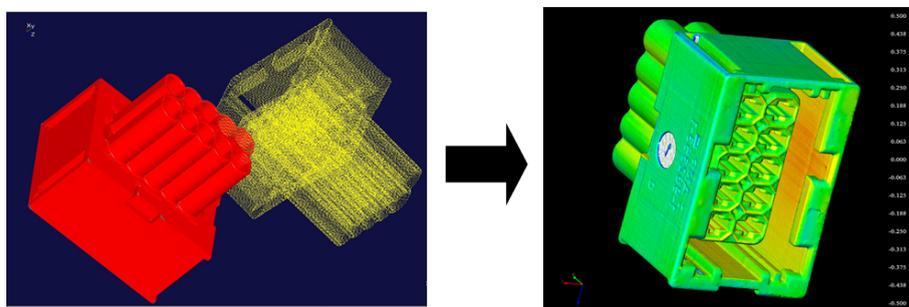


Abbildung 4.7: Transformation zur Anpassung der Koordinatensysteme des CAD-Modells mit der CT-Punktewolke mit farbkodierter Abweichungsdarstellung des Ergebnisses

Damit solch ein Koordinatensystemabgleich durchgeführt werden kann, sind zwei Oberflächenbeschreibungen notwendig. Das bedeutet, dass die Voxeldaten vorab in eine geeignete Grenzfläche extrahiert werden müssen, falls diese nicht vorliegt. Da die Genauigkeit an dieser Stelle eine untergeordnete Rolle spielt, werden nur wenige

Punkte benötigt, um die Form ausreichend zu beschreiben. Darüber hinaus ist keine triangulierte Fläche oder Normaleninformation notwendig. Eine einfache Grenzpunktbestimmung auf Basis eines globalen Schwellwerts genügt den Anforderungen in den meisten Fällen bereits.

Dieser Abgleich ist immer dann durchzuführen, wenn es sich bei der für die Initialisierung zugrunde gelegten Oberfläche um eine externe Datenquelle handelt. Dies ist der Fall bei der Verwendung von Modellen, die nicht aus den Voxeldaten entstanden sind, z.B. CAD-Daten. Sobald die Ausgangsbasis im Volumenmodell und damit im Voxelkoordinatensystem lag, bedarf es keiner zusätzlichen Transformation. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn in aus Voxeldaten erzeugten Punktwolken Regelgeometrien eingepasst wurden.

### 4.3.6 Diskretisierung und Überführung in die Initialoberfläche

Die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Möglichkeiten der Bereichsauswahl liefern noch keine für das hier zu entwickelnde Verfahren idealen Initialoberflächen. Die unterschiedlichen Methoden führen zunächst zu verschiedenen Datenformaten, die zusätzliche Schritte benötigen, um eine angemessene Oberflächenbeschreibung zu erhalten. Zunächst wird an dieser Stelle festgelegt, dass als Ergebnisstruktur Dreiecksnetze erstellt werden, da diese im STL-Format der gängige Standard für die Weiterverarbeitung sind. Folgende Datenformen können aus der ROI-Festlegung resultieren. Diese gilt es, in Dreiecksnetze mit vorgegebenen Bedingungen umzuwandeln. Als optionale Benutzerangaben werden die Punktedichte bzw. die maximal erlaubten Kantenlängen oder die erlaubte Netzgröße bzw. Datenmenge angenommen.

#### a) **Voxelbeschreibung:**

Als Ergebnis von grauwertbasierten Ansätzen oder der manuellen Auswahl in Volumendaten stehen lediglich die relevanten Voxel zur Verfügung.

Notwendige Schritte zur Überführung in ein Dreiecksnetz mit vorgegebenen Anforderungen:

- Lokale Grenzflächenbestimmung im ermittelten Bereich, beispielsweise Marching Cubes Algorithmus nach Binarisierung der Umgebung,
- Ausdünnung und Anpassung des Dreiecksnetzes entsprechend der Eingaben.

#### b) **Punktwolken oder Dreiecksnetze:**

Wird auf Basis gegebener oder aus dem Volumendaten ermittelter Grenzpunkte mit oder ohne Kanteninformation segmentiert, wie bei der krümmungsbasierten ROI-Festlegung, sind folgende Schritte notwendig:

- Triangulierung der Punktdaten und Bestimmung von Normalen, z.B. nach Delaunay [Del34], Ball-Pivoting [BMR<sup>+</sup>99] oder [HK06],
- Ausdünnung und Anpassung des Dreiecksnetzes entsprechend der Eingaben.

c) **Modelle:**

Die modellbasierte Auswahl liefert parametrische oder implizite Beschreibungen, die wie folgt in Dreiecksnetze überführt werden können. Als zusätzliche Information kann hier die maximal erlaubte Abweichung zum Modell angegeben werden.

- Diskretisierung, also Bestimmung der Triangulation durch Bestimmung der Parameter oder Funktionswerte auf Basis der vorgegebenen Bedingungen und entsprechende Berechnung der Punkte, Normalen und Dreiecksinformation. Zum Thema Splinebearbeitung siehe [PBP02].

Es wird deutlich, dass die Beschreibung über ein Modell auf einem direkten Weg zum gewünschten Ziel führt, da hier alle notwendigen Bedingungen bei der Bestimmung der triangulierten Initialoberfläche beachtet werden. In Abbildung 4.8 sind verschiedene Möglichkeiten der Erstellung eines Dreiecksnetzes dargestellt. Es kann sowohl das gesamte Modell gleichmäßig oder patchabhängig unterschiedlich unterteilt werden. Darüber hinaus lassen sich einzelne Patches auswählen. Es besteht außerdem

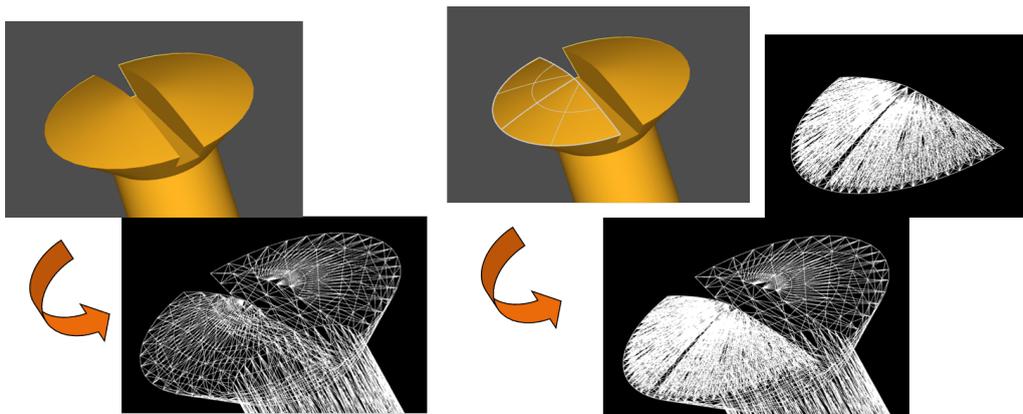


Abbildung 4.8: CAD-Modell einer Schraube gleichmäßig trianguliert (links), patchabhängig unterschiedlich trianguliert (rechts unten), nur ein Patch trianguliert (rechts oben)

im Gegensatz zu den anderen Methoden kein Bedarf an aufwendigen Triangulations- und Netzreduktionsverfahren, die der Grundidee des Nichterfordernisses von Vor- und Nachbearbeitungsschritten widersprechen.

### 4.3.7 Ableitung der geeigneten Initialisierungsmethode

Für eine Zusammenfassung und Bewertung der Eignung der vorgestellten Verfahren wird erneut die Tabelle 4.1 herangezogen. Aus dieser geht hervor, welche Größen auf die Bereichsauswahl der Initialisierung Einfluss haben sollen, nämlich sowohl Informationen aus den Voxeldaten als auch aus der Oberfläche selbst und zwar in beliebiger Ausprägung. Keines der Verfahren liefert dies alleinstehend. Die modellbasierte Auswahl kommt den Anforderungen am nächsten, vor allem dann, wenn vollständige CAD-Daten inklusive Materialinformationen vorliegen (siehe Abbildung 4.9).

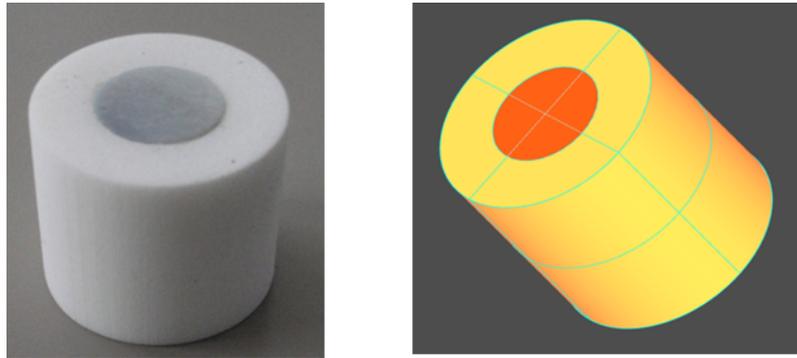


Abbildung 4.9: Bauteil bestehend aus zwei Materialien (links), dazugehöriges CAD-Modell mit Materialunterscheidung (rechts)

Im Allgemeinen ist aber eine Kombination oder Erweiterung der Verfahren notwendig, um die Abdeckung aller Anforderungen zu gewährleisten. Aus den bereits dargelegten Gründen bietet die Nutzung von Modellen eine gute Ausgangslage. Ein Nachteil ist hier, dass nicht zwingend Materialinformationen vorhanden sind. Da jedoch bei der Verwendung externer Modelle auf jeden Fall ein Abgleich der Koordinatensysteme stattfinden muss, ist eine ausreichende Übereinstimmung der Voxel- und Initialoberfläche voraussetzbar. Das bedeutet, dass die korrespondierende Grauwertinformation zu einem Oberflächenpunkt vorhanden ist und mit Hilfe einer grauwertbasierten Analyse genutzt werden kann, um einem Punkt die benötigten Informationen über Material oder Materialübergänge zuzuweisen. Ein weiteres entscheidendes Problem ist, dass häufig keine Modelldaten zur Verfügung stehen. Wie beschrieben, lässt sich aber eine Vielzahl an Bauteilen über die Einpassung von Geometrien in eine parametrische oder implizite Beschreibung überführen. Hierfür ist wiederum eine grobe Vorabpunktwolke, jedoch kein Koordinatenabgleich notwendig. Da eventuell auch Krümmungsinformationen von Interesse sind, liegt es nahe, den bereits erläuterten krümmungsbasierten Ansatz heranzuziehen, siehe auch [KEV12]. Auf diese Weise sind alle Gegebenheiten und Anforderungen an die Initialisierungsoberfläche bedacht und umsetzbar.

## 4.4 Einbringung von übergeordnetem Vorwissen

Neben den Eingabemöglichkeiten, die Einfluss auf die Netzinitialisierung haben, existiert auch Vorwissen, das in übergeordneter Form zugewiesen werden kann. Dabei handelt es sich um die Informationen, die für die Aufstellung der Energiefunktionen relevant sind. In diesem Abschnitt wird zunächst ein Überblick darüber gegeben, welches Wissen von Interesse ist und in welcher Form es in das Verfahren einfließen kann. Außerdem werden die einzelnen Arten von Informationen, deren sinnvolle Verwendungsmöglichkeiten sowie deren Auswirkungen und Bedeutung betrachtet.

### 4.4.1 Bedingungen an das Vorwissen

Zusätzliches Vorwissen muss in den zur Verfügung stehenden Daten direkt enthalten oder berechenbar sein, damit sie zur Bewertung genutzt werden können. Das schränkt die Möglichkeiten ein auf Informationen bezüglich der Volumendaten oder der Initialoberfläche. Bei ersterem sind dies alle Eigenschaften, die sich auf Grauwerte zurückführen lassen und bei den Oberflächen vorwiegend geometrische, vor allem krümmungsabhängige, Eigenschaften. Bei den Eingabedaten handelt es sich um Sollangaben, die zu geforderten Anforderungen passen und vom Anwender vorgegeben sein müssen. Solche Sollangaben können explizite Werte sein oder relative Angaben, im Speziellen Extremwerte. Darüber hinaus sollen derartige Angaben über das Initialnetz variieren können. Das bedeutet, die Informationen müssen mit den Knoten des Dreiecksnetzes in Zusammenhang stehen und für jeden einzelnen Knoten muss eine Bedingung vorliegen. Da auch mehrere Bedingungen formuliert und kombiniert werden können, sollte auch die Gewichtung in Abhängigkeit der Aufgabe, also nutzerdefiniert, einstellbar sein. Zusammenfassend sind jedem Knoten sowohl geeignete Sollangaben sowie deren Gewichtung zugeordnet, die innerhalb der Energiefunktionen sinnvoll aufgestellt und minimiert werden können.

### 4.4.2 Grauwert- und Gradienteninformationen

Eine wichtige vorhandene Größe ist die zugrunde liegende Grauwertinformation. Wie bereits erläutert bilden die Grauwerte in CT-Daten ein Bauteil material- und geometrieabhängig ab. Ein Grauwertbereich könnte innerhalb eines CT-Volumens beispielsweise einem bestimmten Material oder einer bestimmten Wandstärke entsprechen, ausgehend von der Durchstrahlrichtung. In der Realität ist die Grauwertverteilung aufgrund seiner in 2.3 beschriebenen Einflussfaktoren nicht derart homogen und eindeutig. In Abbildung 4.10 ist das Schnittbild des Voxelmodells eines Stufenzylinders aus Kunststoff zu sehen. Die unterschiedlichen Wandstärken bilden sich zwar in den Schattierungen der Ebenen ab, jedoch ist direkt erkennbar, dass innerhalb eines Bereichs starke Schwankungen auftreten.

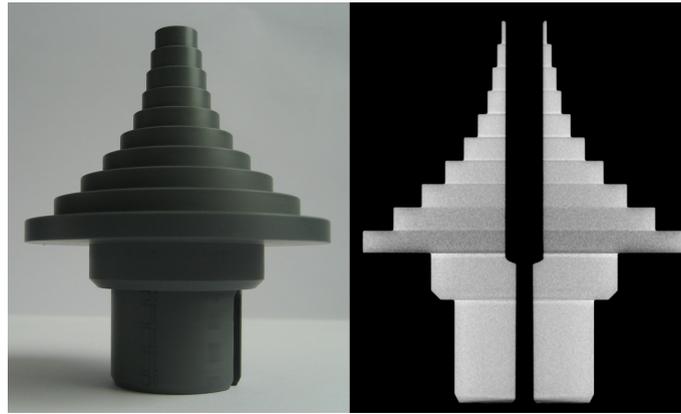


Abbildung 4.10: Stufenzylinder aus Kunststoff (links) und Schnittbild durch das zugehörige Voxelmodell (rechts)

Um diesen Effekt genauer hervor zu heben, werden in Abbildung 4.11 die absoluten Grauwertverläufe entlang definierter Linien betrachtet. Es ist deutlich erkennbar, begründet durch die in 2.2 erläuterte logarithmische Schwächung der Röntgenstrahlung, dass entlang einer Linie kein homogener Grauwertverlauf gegeben ist. Hinzu kommen durch Rauschen bedingte Schwankungen. Diese breite Variation der Grauwerte innerhalb eines Materials und einer Wandstärke führt schnell zu Überlappungen der Grauwertinformationen mit anderen Bereichen, wie in diesem Beispiel gut zu erkennen ist.

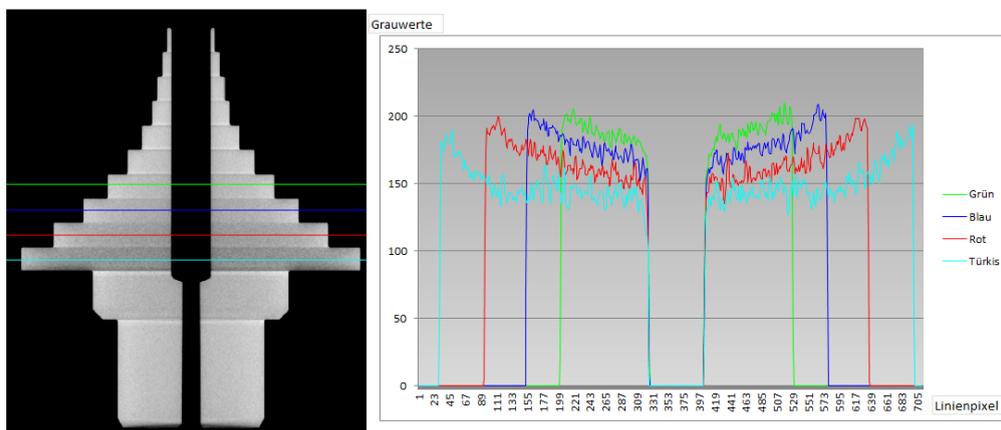


Abbildung 4.11: Schnittbild des Stufenzylinders mit definierten Linien (links), dazugehörige Grauwertverläufe absolut aufgetragen (rechts)

Die Nutzung von absoluten Grauwerten, sozusagen Sollgrauwerten, als Suchkriterium ist aus diesem Grund bei vielen Volumenmodellen kritisch. Allerdings führt die Bereichseinschränkung durch die Initialisierung dazu, dass sich sinnvolle Verwendungen ergeben können. Um tatsächlich Grenzflächen zu bestimmen, muss diese Anforderung in jedem Fall um eine zusätzliche Bedingung ergänzt werden. Dies kann in Anlehnung an binäre Schwellwertverfahren beispielsweise die Forderung an

die Nachbarumgebung sein, dass ein Sollwert zwischen gegebenen Grauwerten des betrachteten Bereichs liegen muss. Anders als bei Schwellwertverfahren muss es sich nicht um die direkten Nachbarn handeln. Außerdem ist zusätzlich zu derartigen Bedingungen die Angabe einer Toleranz denkbar. Gerade bei starken Kontrastunterschieden (wie häufig bei Luft/Material), bei denen globale Schwellwertverfahren, wie der Marching Cubes Algorithmus, bereits sehr gute Ergebnisse liefern, kann ein solches Vorgehen zielführend sein. Handelt es sich bei der Angabe um ein gesuchtes Material, das innerhalb eines Bauteils an seinen Grenzen verschiedene Materialübergänge aufweist, ist dies nicht der Fall. Hier müssen relative Bedingungen eingesetzt werden, die sich an den Grenzübergängen adaptiv verhalten. Dabei kann es sich klassischerweise um die Suche nach dem maximalen Gradienten handeln, der schon bei den Snakes als Forderung beschrieben ist. Diese Bedingung kann alleinstehend genutzt oder wiederum an gesuchte Grauwertbereiche gebunden werden. Die reine Gradientensuche hat jedoch den Nachteil, dass sie empfindlich auf Rauschen und kleine Schwankungen reagiert vor allem in Bereichen mit geringeren Kontrastunterschieden. In Abbildung 4.12 ist jeweils der Pixel markiert, an welchem der größte Gradient vorliegt. Die Schwankungen sind deutlich an mehreren Stellen erkennbar. Eine Glättung der Grauwertumgebung, eine Normierung durch die Nachbarumgebung oder das Steuern der lokalen Krümmung schaffen hier Abhilfe.

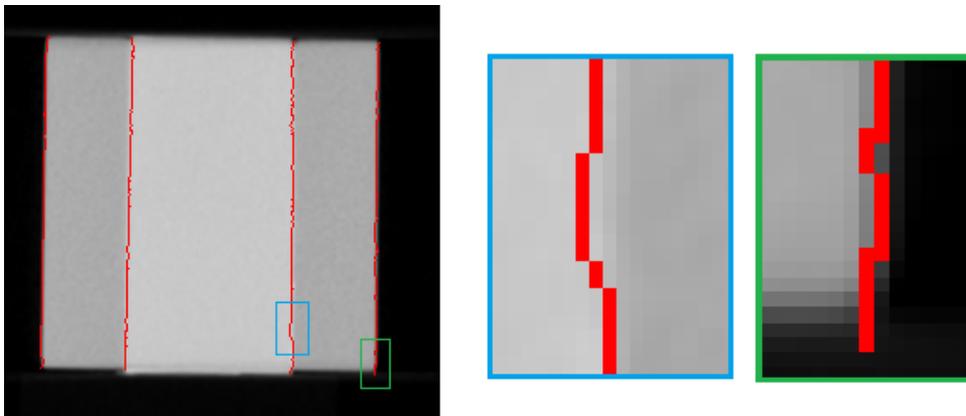


Abbildung 4.12: Schnittbild durch CT-Volumen des Multimaterialzylinders aus Kunststoffen mit Markierung der Pixel mit dem größten Gradienten, sowohl zwischen den Materialien als auch zwischen Luft und Material

Bei Suche nach dem maximalen Gradienten ist darauf zu achten, ob sich mehr als ein Grauwertübergang im Suchbereich befindet, da dies zu Uneindeutigkeiten führen kann. So etwas kommt häufig bei Spalten und Löchern zwischen verschiedenen Materialien vor, siehe Beispiel in Abbildung 3.1 unten mit sichtbarem Loch zwischen den Materialien. Neben der maximalen Gradientensuche ist ebenso die Vorgabe eines Sollgradienten denkbar. Diesen absolut anzugeben, birgt aber die gleichen Schwierigkeiten wie die Nutzung des nominalen Grauwerts. Eine sinnvolle Bedingung kann

#### 4. Konzeption einer aufgabenbasierten Oberflächenextraktion

beispielsweise die Angabe einer oberen Grenze für einen Gradienten sein. Damit lässt sich die Suche nach einem bestimmten Materialübergang steuern. Dies kann jedoch erneut nicht alleinstehend funktionieren und bedarf immer zusätzlicher notwendiger Bedingungen. Bei Gradienten ist hierfür die Richtung, also das Vorzeichen, ein wichtiges Merkmal, das zur Identifikation gesuchter Übergänge herangezogen wird.

Die beschriebenen Problemstellungen lassen sich für den eindimensionalen Fall von Grauwertübergängen in einem eingeschränkten Bereich grob in drei Fälle unterscheiden. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich der gesuchte Übergang innerhalb dieses Bereichs befindet und mit einer oder mehreren Bedingungen eindeutig bestimmbar ist. Je nach Aufgabenstellung stehen unterschiedliche Informationen zur Verfügung und sind für die korrekte Übergangssuche notwendig. In Tabelle 4.2 sind diese drei Fälle beschrieben und idealisiert dargestellt, sowie die genannten Möglichkeiten der Grauwertnutzung zur Grenzfindung zusammengefasst.

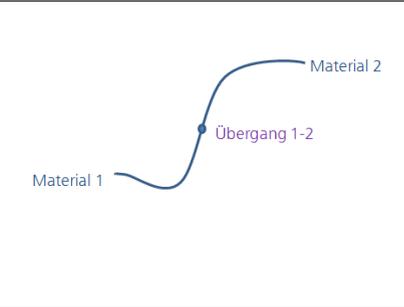
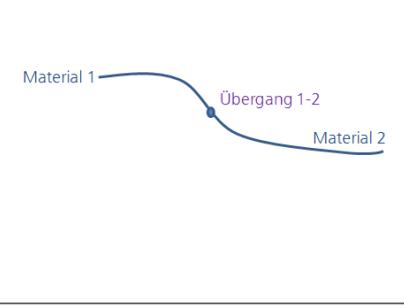
Darstellung	Beschreibung	Mögliche Grauwertbetrachtung
	<p>Großer Kontrast zwischen Material 1 und 2, eventuell gegeben: Grauwert (und -bereiche) von Material X</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Größter Gradient (alleinstehend)</li> <li>• Größter Gradient kombiniert mit Materialwert</li> <li>• Bestimmung eines Schwellwerts aus Sollgrauwerten oder -bereichen</li> </ul>
	<p>Geringer Kontrast zwischen Material 1 und 2, eventuell gegeben: Grauwert (und -bereiche) von Material X</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Größter Gradient kombiniert mit Materialwert</li> <li>• Größter Gradient mit Vorzeichenbeachtung</li> </ul>
	<p>Weiteres Füllmaterial zwischen Material 1 und 2, eventuell gegeben: Grauwert (und -bereich) von Material X</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Größter Gradient kombiniert mit Materialwert</li> <li>• Größter Gradient mit Vorzeichenbeachtung</li> <li>• Nutzung eines Sollgradienten (relativ) kombiniert mit Materialwert</li> </ul>

Tabelle 4.2: Eindimensionale Fälle für Grauwertverläufe

Diese Fälle treten nicht unbedingt getrennt voneinander auf, da es an der Grenze eines Materials zu verschiedenen Übergängen (Fall 1 und 2) sowie zu indirekten Übergängen durch Fremdmaterial, Spalte oder ähnliches (Fall 3) kommen kann. Diese Unterscheidung muss also punktabhängig und voll automatisch ohne Nutzerinteraktion erfolgen. Die Betrachtung von zwei- oder dreidimensionalen Voxelnachbarschaften ist zwar komplexer, lässt sich aber bezüglich der Betrachtungskriterien ebenfalls auf diese Fälle zurückführen. Anstelle von Linien würden hier beispielsweise Vektorfelder als Ausgangslage genutzt.

Zusammenfassend ist die Nutzung von lokalen Grauwerten zur Identifikation einer bestimmten Grenze nicht trivial und muss an die jeweiligen Gegebenheiten anpassbar sein. Darüber hinaus ist sie eng verknüpft mit der Wahl der betrachteten Umgebung, die in den folgenden Abschnitten ebenfalls bei der Normierung der Energiefunktionen sowie bei der Bewegungsrichtung eine große Rolle spielt, und dort erneut aufgegriffen wird. Bisher wurde nur die voxelbasierte Grauwertbetrachtung beschrieben. Die Möglichkeiten der Interpolation folgen in 4.7.

### 4.4.3 Krümmungsinformationen

Neben den Grauwerten spielen Krümmungsinformationen eine entscheidende Rolle. Sie können zunächst in direkter Form für die Oberflächenfindung genutzt werden, indem entsprechende Sollwerte angegeben werden. Dies ist sinnvoll, wenn bestimmte Formen an einem Bauteil oder auch bestimmte Abweichungen von Sollgeometrien gesucht sind. Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit der Betrachtung von vorhandener Rauheit und Glattheit. Darüber hinaus ist auch die indirekte Nutzung der Informationen sehr nützlich. Schon bei den klassischen Snakes wurde die Krümmung minimiert, um damit eine möglichst glatte Kontur zu finden. Bei den Level Sets dient sie unter anderem zur Bestimmung der Suchrichtung und Variation der Topologie der Ausgangskontur. Um die Anwendungsmöglichkeiten zu erfassen, wird zunächst auf einige grundlegende Fakten zur Nutzung von Krümmungen in Dreiecksnetzen eingegangen.

Zur Berechnung der Krümmung von regulären Flächen im  $\mathbb{R}^3$  werden in der Differentialgeometrie zwei Formen genutzt: Die Gaußkrümmung und die mittlere Krümmung. Diese berechnen sich aus den beiden Hauptkrümmungen  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ , welche jedem Oberflächenpunkt zugeordnet werden können. Bei den Hauptkrümmungen handelt es sich um die kleinste und größte Krümmung auf allen Kurven, die sich durch einen Ebenenschnitt der Oberfläche durch den jeweiligen Punkt entlang seiner Normale ergeben. Für die Gaußkrümmung  $K$  gilt

$$K = \kappa_1 * \kappa_2$$

und für die mittlere Krümmung  $H$

$$H = \frac{1}{2} * (\kappa_1 + \kappa_2).$$

Ist  $K > 0$ ,  $K = 0$  oder  $K < 0$  im Punkt  $x$ , handelt es sich um einen so genannten elliptischen, parabolischen oder einen hyperbolischen Punkt, siehe Abbildung 4.13. Bei einem flachen Punkt ist  $K = H = 0$ . Umgekehrt lassen sich die Hauptkrümmungen bei gegebener Gauß- und mittlerer Krümmung aus diesen bestimmen [BP94]

$$\kappa_{1,2} = H \pm \sqrt{H^2 - K}$$

Um sie für Dreiecksflächen zu nutzen, müssen die Krümmungen für den diskre-

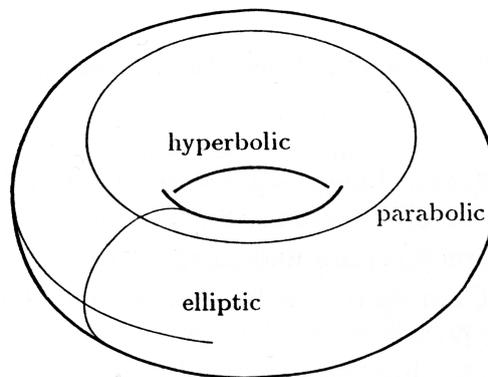


Abbildung 4.13: Elliptische, hyperbolische und parabolische Punkte auf einem Torus [BP94]

ten Fall formuliert bzw. angenähert werden. Grundlagen hierzu sind zu finden bei [DMSB99] und [DMSB03]. Die diskrete Gaußkrümmung lässt sich für einen Knotenpunkt  $p$  folgendermaßen beschreiben

$$K(p) = 2\Pi - \sum_{i \in \Delta(p)} \alpha_i,$$

wobei es sich bei  $\Delta(p)$  um die Menge der angrenzenden Nachbardreiecke und bei  $\alpha$  um den dazugehörigen angrenzenden Winkel handelt. Die Gaußkrümmung ist invariant gegenüber Skalierungen und Isometrien, hier Verknickungen. Das bedeutet, dass mit dieser Beschreibung der Gaußkrümmung nicht festgestellt werden kann, in welche Richtung das Netz gekrümmt ist. Vorzeichenbehaftete Versionen der Gaußkrümmung schaffen hier Abhilfe. Aufgrund ihres Zusammenhangs mit den Hauptkrümmungen ist sie 0 sobald ein Faktor 0 ist. Das heißt, ein Punkt auf der Kante

zwischen zwei Ebenen nimmt den Wert 0 an. Die mittlere Krümmung  $H$  kann diskret formuliert werden als

$$H(p) = \frac{1}{4\text{area}(\Delta(p))} \left\| \sum_{j \in N(p)} (\cot \beta_j + \cot \gamma_j)(p - q_j) \right\|,$$

wobei es sich bei  $\text{area}(\Delta(p))$  um den Flächeninhalt aller angrenzenden Dreiecke von  $p$  handelt.  $N(p)$  ist die Menge der Nachbarnpunkte von  $p$  und  $q_j$  ein entsprechender Nachbarpunkt. In Abbildung 4.14 ist ein Punkt mit seiner Dreiecks Umgebung und allen genannten Winkeln dargestellt.

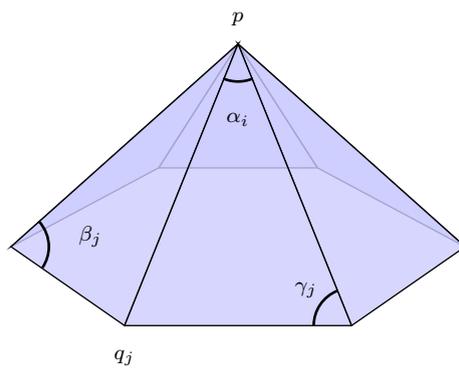


Abbildung 4.14: Netzknoten  $p$  mit Dreiecks Umgebung  $\Delta(p)$

Die praktische Anwendbarkeit und ausreichende Näherung dieser Formen der Gauß- und der mittleren Krümmung wurde beispielsweise bei [Ehr04] gezeigt. Eine ausführliche Zusammenfassung weiterer Methoden zur Diskretisierung beider Krümmungen ist bei [MSR07] und vergleichende Tests bei [RB05] zu finden. Da die Krümmung hier zur Bewertung herangezogen wird, sind entsprechende Überlegungen notwendig. Ein Vergleich mit Sollwerten ist bei der Gaußkrümmung aus genannten Problemen nicht sinnvoll. Zudem ist ein geringer Wert für die Gaußkrümmung, wie bereits erwähnt, keine hinreichende Bedingung für einen ebenen Punkt, ebenso bei der mittleren Krümmung. Eindeutig ist dieser nur bei  $H = K = 0$ . Das bedeutet, dass zu einer ausreichenden Beurteilung der Werte beide Krümmungsarten betrachtet oder jeweils die Hauptkrümmungen aus  $K$  und  $H$  nach obiger Definition geschätzt werden müssen. Da es sich hier um beliebige Dreiecksnetze handelt, ist nicht gewährleistet, dass diese Berechnung der Realität entspricht. Handelt es sich bei dem Initialdreiecksnetz um ein aus Modellen entstandenes Netz, kann von einer sehr guten Annäherung der Krümmungswerte als Ausgangssituation ausgegangen werden. Die Hauptkrümmungen geben also ebenso einen Hinweis auf eine vorliegende Geometrie. Jedoch ist die Gestalt dieser Netze häufig geprägt von recht- und stumpfwinkligen Dreiecken, was

zur Gewährleistung der numerischen Stabilität bei der Berechnung berücksichtigt werden muss. Zur Bestimmung der Werte  $k_1$  und  $k_2$  aus den diskreten Krümmungen für beliebige Dreiecksnetze definiert daher [DMSB03] die diskrete Gaußkrümmung und mittlere Krümmung als

$$K(p) = \frac{1}{A_{mixed}(\Delta(p))} \cdot \left( 2\Pi - \sum_{i \in \Delta(p)} \alpha_i \right)$$

$$H(p) = \frac{1}{4A_{mixed}(\Delta(p))} \left\| \sum_{j \in N(p)} (\cot \beta_j + \cot \gamma_j)(p - q_j) \right\|,$$

wobei der Flächeninhalt  $A_{mixed}$  der umgebenden Dreiecke von  $p$  in Abhängigkeit der Winkel entsteht. Handelt es sich um ein spitzwinkliges Dreieck  $T$ , geht als Flächeninhalt der Anteil der Voronoiumgebung von  $p$  in  $T$  ein. Also gilt für ein Dreieck  $P, Q$  und  $R$

$$A_{Voronoi} = \frac{1}{8} (|PR|^2 \cot \angle Q + |PQ|^2 \cot \angle R).$$

Liegt ein stumpfwinkliges Dreieck vor, wird ein Anteil des Flächeninhalts  $area(\Delta)$  bedacht. Der Algorithmus kann in Anlehnung an Desbrun [DMSB03] folgendermaßen zusammengefasst werden:

```

AMixed = 0;
für alle Nachbardreiecke Delta von p
{
    if(Delta ist spitzwinklig)
        AMixed += AVoronoi;
    else
        if(stumpfer Winkel bei p)
            AMixed += 0.5 * area(T);
        else
            AMixed += 0.25 * area(T);
}

```

Zusammenfassend kann die Krümmung in vielfältiger Hinsicht Einfluss auf eine Bewertung nehmen, jedoch ist hierbei auf die Form der Information zu achten. In Tabelle 4.3 sind die denkbaren Anforderungen sowie die Möglichkeiten der Nutzung von Krümmungsinformationen zur Lösung zusammengefasst.

Darüber hinaus müssen die Ränder bei nicht geschlossenen Dreiecksnetzen gesondert betrachtet werden. Darauf muss in der praktischen Umsetzung des Verfahrens in Kapitel 5 Rücksicht genommen werden und eine angemessene Betrachtung erfolgen.

Beschreibung der Anforderung	Mögliche Krümmungsinformationen
Möglichst glatte Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>K</math> und <math>H</math> möglichst klein,</li> <li>• <math>k_1</math> und <math>k_2</math> möglichst klein.</li> </ul>
Nähe zu einer Sollgröße absolut	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>K</math> und <math>H</math> nahe zu Sollwerten</li> <li>• <math>k_1</math> und <math>k_2</math> nahe zu Sollwerten</li> </ul>
Nähe zu einer Sollgröße relativ, z.B. elliptischer Punkt oder Kante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>K</math> entspricht Bedingung, z.B. <math>K &gt; 0</math> oder <math>K = 0</math>,</li> <li>• <math>H</math> entspricht Bedingung, z.B. <math>H &gt; 0</math>, keine Aussage zur Kante möglich,</li> <li>• <math>k_1</math> und <math>k_2</math> entsprechen Bedingung, z.B. <math>k_1 &gt; 0</math> und <math>k_2 &gt; 0</math>, <math>k_1 = 0</math> oder <math>k_2 = 0</math></li> </ul>
Ähnlichkeit zu einer Regelgeometrie, beschreibbar durch Hauptkrümmungen oder Relation von $K$ und $H$ zueinander, z.B. Kugel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>k_1</math> und <math>k_2</math> ähneln den Anforderungen, z.B. <math>k_1 = k_2</math></li> <li>• <math>K</math> und <math>H</math> ähneln den Anforderungen, z.B. <math>K = H^2</math></li> </ul>

Tabelle 4.3: Fälle für Krümmungsanforderungen und notwendige Informationen

#### 4.4.4 Weitere Varianten von Vorwissen

Neben den beschriebenen Arten von Anforderungen durch die Vorgabe von Wissen über die Aufgabe oder die Sollstruktur gibt es eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten. Durch die Nutzung der Aktiven Konturen ist im Prinzip jede Art von Information, die sich als Energiefunktion formulieren lässt, denkbar. Einzige Einschränkung ist die bereits erwähnte Notwendigkeit, dass die Angaben im gegebenen Initialdreiecksnetz oder Volumenmodell berechenbar oder identifizierbar sein müssen. Einige Beispiele hierfür sind

- **Materialangaben:** Die Angabe von absoluten Werten zur Beschreibung von Materialien ist bei CT-Daten nicht ohne Weiteres möglich. Stehen jedoch Referenzdaten aus früheren CT-Aufnahmen gleicher Bauteile und gleicher Aufnahmebedingungen zur Verfügung, ließe sich durchaus eine Korrelation beispielsweise zwischen Materialdichte und Grauwerten herstellen, sodass diese als Eingabe verwendet werden können.

- **Wandstärken:** Auch maßliche Zusammenhänge können bei einer Problemstellung eine Rolle spielen. Es können beispielsweise bei einem Bauteil gewisse Wandstärken von Interesse sein. Diese lassen sich in den Dreiecksnetzen mit Hilfe der Normaleninformationen leicht berechnen und als Zusatzfunktion in die Oberflächenfindung einfügen.
- **Texturen:** In den Volumendaten sind häufig auch Strukturen sichtbar, die sich im Bild als 2D- oder 3D-Texturen betrachten lassen. Diese lassen sich mit Hilfe automatischer Bildverarbeitungsalgorithmen als Muster klassifizieren und bewerten [Pan05]. Damit lassen sie sich als Suchkriterium einsetzen. In Abbildung 4.15 ist der Schnitt durch das Volumen eines kohlefaserverstärkten Kunststoffbauteils (CFK) mit deutlich erkennbarer Struktur der Faserwebung zu sehen.
- **Spaltanalyse:** Mit Hilfe der eingepassten Initialisierung kann nicht nur eine Grenze gesucht werden. Ist beispielsweise die Detektion und Messung von Spalten die Aufgabenstellung, kann die Umgebung direkt nach zwei Grenzen abgesucht und deren Abstand unmittelbar angegeben werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 4.16 zu sehen.
- **Rauheiten:** Haben die Voxeldaten eine ausreichende Detailauflösung, können auch Oberflächenrauheiten identifiziert werden. Diese lassen sich im ungeglätteten Dreiecksnetz bestimmen und als globale Bedingung (für eine feste Umgebung) bewerten.

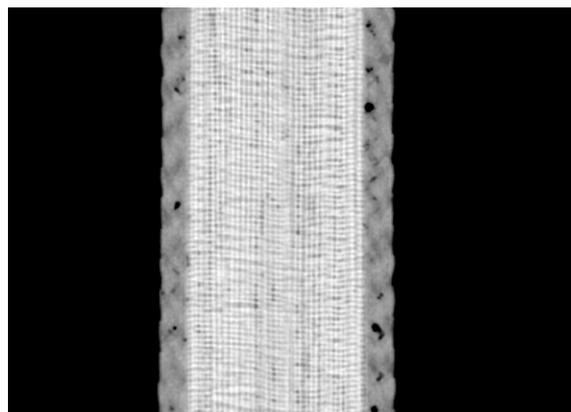


Abbildung 4.15: Schnitt durch das Voxelmodell eines CFK-Bauteils mit sichtbarer Textur

Das Einbringen von zusätzlichem Wissen und Anforderungen durch die Aufgabenstellungen kann vielfältig sein und muss für die Bedingungen und Restriktionen an das Verhalten der Oberflächenfindung jeweils angepasst werden. Einige Umstände können jedoch nicht als Nutzerangabe erwartet werden und müssen automatisch ermittelt werden, z.B. Fremdmaterialien. Außerdem ist die Kombination und deren

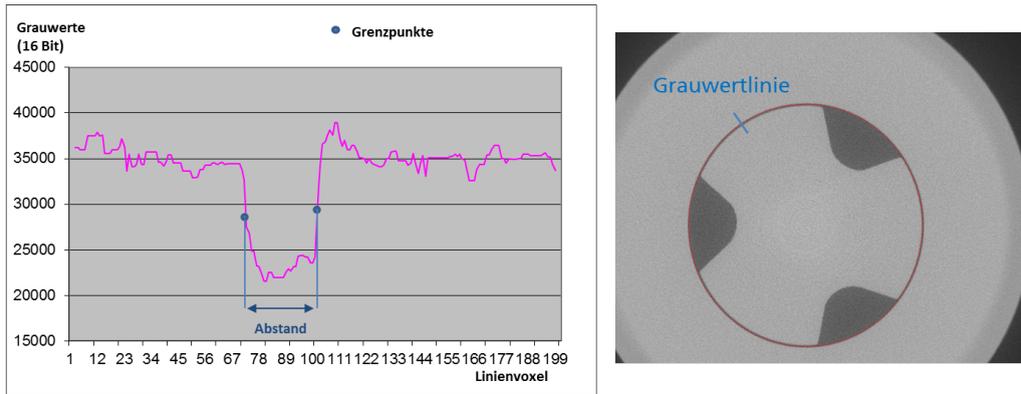


Abbildung 4.16: Beispiel für Spaltanalyse: Schnitt durch das Voxelmodell eines Dieselinjektors mit markierter Grauwertlinie (rechts) und Grauwertverlauf mit Spaltdektion und Abstandsbestimmung (links)

gegenseitige Beeinflussung ein wichtiger Punkt. Unsicherheiten in der grauwertbasierten Grenzpunktbestimmung, z.B. bei der reinen Gradientenmaximierung, können durch Forderungen an die Glattheit ausgeglichen werden. Die Kombinationsmöglichkeiten sind genauso vielfältig wie die Auswahl an denkbaren Informationen. Im Rahmen der Umsetzung und Evaluation des Verfahrens wird die Implementierung und detaillierte Analyse vorwiegend auf die Grauwerte und Krümmungen in genanntem Umfang fokussiert, da sich viele weitere Anwendungen auf diese Beschreibungen zurückführen lassen.

## 4.5 Aufstellen der Energiefunktionen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Möglichkeiten des Einbringens von Vorwissen und Informationen erläutert. Um diese für eine iterative Oberflächensuche nutzen zu können, müssen sie in berechenbare, eindeutige und vergleichbare Funktionen umgewandelt werden. Dazu wird auf die in den Snakes verwendeten Energiefunktionen zurückgegriffen. In diesem Abschnitt werden entsprechende Energiefunktionen für die genannten Anwendungsfälle der grauwert- und der krümmungsbasierten Bedingungen formuliert und für den praktischen Einsatz optimiert.

### 4.5.1 Erläuterung zu Energiefunktionen

Die Energiefunktionen dienen der Bewertung der aktuellen Position eines Knotens des Dreiecksnetzes in Korrelation mit den darunter liegenden Objektdaten. Es ist also notwendig, unabhängig von der Anzahl und Form der Energiefunktionen für jeden Knoten und für jede Position einen Wert berechnen zu können. Das bedeutet, die Energien müssen kombinierbar sein und sollen sich beeinflussen, ohne sich gegenseitig aufzuheben. Folglich ist für jede Funktion eine geeignete Normierung durchzuführen.

Zudem muss jede Energiefunktion für die spätere Minimierung bei größerer Übereinstimmung mit dem Idealwert kleiner werden. Zur Bestimmung einer Gesamtenergie ist außerdem die zugehörige Gewichtung der einzelnen Komponenten möglich. Die Energie eines Knotens entsteht also aus den normierten und gewichteten Einzelkomponenten, welche schließlich minimiert wird. Diese globale Minimierung kann durch lokale Bedingungen an die Knoten- oder Einzelenergien erweitert werden.

### 4.5.2 Grauwertbasierte Energiefunktionen

Aus Tabelle 4.2 lässt sich entnehmen, welche grauwertbezogenen Eingangsdaten oder Anforderungen in Energiefunktionen verarbeitet werden müssen. Die einfachste Form ist die Beschreibung des größten Gradienten als

$$E_{Grad}(i) = -|grad(g(i), g(i + 1))|,$$

mit

$$grad(x, y) = y - x,$$

wobei es sich bei  $g(i)$  um den Grauwert an der Stelle des Punkts  $p_i$  handelt. Diese Energie hat den Wertebereich  $[-grad_{max}, 0]$ . Da bei CT-Daten der Wertebereich der Intensitäten bekannt ist, lässt sich der maximale Gradient  $grad_{max}$  bestimmen und alternativ

$$E_{Grad}(i) = grad_{max} - |grad(g(i), g(i + 1))|$$

formulieren.

Wie bereits beschrieben sollte die Bestimmung der Grenzen eines Materials unabhängig von den vorkommenden Materialübergängen sein. Dazu ist eine vorangehende Identifizierung des aktuellen Falls für jeden Knoten notwendig, sodass eine zugehörige Energiefunktion gewählt werden kann. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass der Suchbereich derart gewählt ist, dass linksseitig Material 1 und rechtsseitig Material 2 vorliegt, besteht eine Lösung in der Bereichsklassifizierung innerhalb des Suchbereichs. Solange sich die Grauwerte ähneln, wird jeweils von rechts und von links kommend zu einem Materialbereich zusammengefasst. Für beide Seiten wird auf dieser Basis ein Mittelwert  $GW_{links}$  und  $GW_{rechts}$  bestimmt. Der noch nicht klassifizierte mittlere Bereich stellt den Übergang dar. Betrachtet man hier wiederum den mittleren Grauwert  $GW_{Mitte}$ , lässt sich der vorliegende Fall identifizieren. In Abbildung 4.17 ist diese Klassifikation anhand von Beispielerläufen dargestellt.

Das Ergebnis liefert eine Aussage über die gesuchte Richtung des Gradienten. In Abhängigkeit davon, welches Material gesucht ist, wird das Vorzeichen des Gradienten ermittelt, um den korrekten lokalen Übergang zu finden. Wird das linksseitige Material mit Durchschnittsgrauwert  $GW_{nom}$  gesucht, dann gilt:

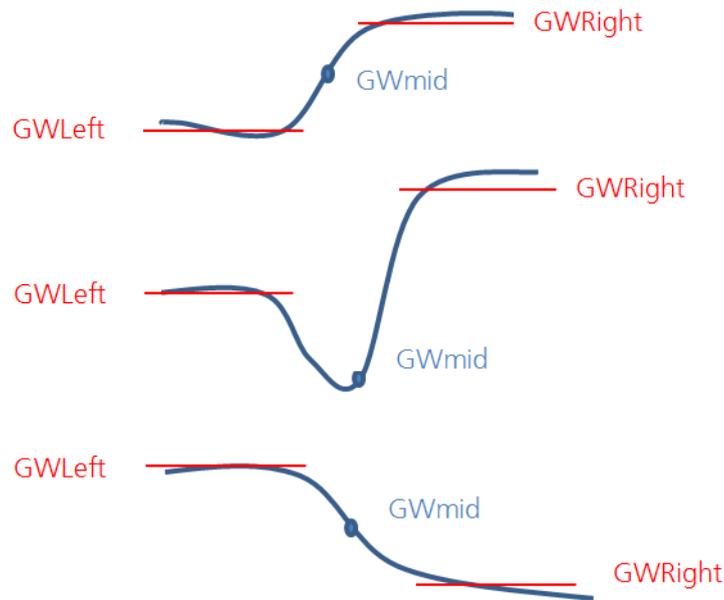


Abbildung 4.17: Automatische Klassifikation der Fälle der Grauwertübergänge

Wenn  $(GW_{mitte} - GW_{nom}) < 0$ , dann muss  $grad(g(i), g(i + 1))$  negativ sein, also  $sig = 1$

Wenn  $(GW_{mitte} - GW_{nom}) > 0$ , dann muss  $grad(g(i), g(i + 1))$  positiv sein, also  $sig = -1$

Der Gradient hat die korrekte Richtung, wenn  $(grad \cdot sig) < 0$ . Ist der rechtsseitige Materialwert gesucht, dann ist  $(grad \cdot sig) > 0$  die richtige Richtung. Für die Energie  $E_{Mat}$ , basierend auf einem gegebenen Materialwert, bedeutet das entweder die direkte Einführung einer Bedingung, hier für die linke Seite, also unter der Voraussetzung  $(GW_{links} - GW_{nom}) \approx 0$ ,

$$E_{Mat(links)}(i) = \begin{cases} E_{Grad}(i), & ((grad \cdot sig) < 0) \\ grad_{max}, & ((grad \cdot sig) > 0) \end{cases} .$$

oder die indirekte Formulierung innerhalb der Funktion

$$E_{Mat(links)}(i) = grad(g(i), g(i + 1)) * sig$$

Damit nimmt der falsche Gradient automatisch einen positiven Energiewert an, was bei der Minimierung indirekt zu einer schlechten Bewertung führt. Allerdings besteht bei kleinen Grauwertunterschieden in Verbindung mit weiteren Energiefunktionen

die Gefahr, dass ein geringer positiver Wert als ausreichend passend betrachtet wird. Dies ist bei der direkten Fallunterscheidung nicht möglich.

Bisher wurde lediglich die Berechnung auf Basis des maximalen Gradienten mit und ohne Berücksichtigung gegebener Materialinformationen gezeigt. Wie oben beschrieben können aber auch direkte nominale Angaben des Grauwertes  $GW_{nom}$  oder des Gradienten  $grad_{nom}$  formuliert werden.

$$E_{GW_{nom}}(i) = |GW_{nom} - g(i)|$$

oder analog

$$E_{Grad_{nom}}(i) = |grad_{nom} - grad(g(i), g(i + 1))|,$$

wobei bei letzterem erneut die Vorzeichen berücksichtigt werden. Diese Angaben führen aber alleinstehend zumeist nicht zu den gewünschten Ergebnissen. Wie bereits erläutert kann ein nominaler Gradient als relative Bedingung ähnlich wie bei den Vorzeichen eingesetzt werden. Beispielsweise kann gelten

$$E_{Grad_{nom}}(i) = \begin{cases} E_{Grad}(i), & grad \leq grad_{nom} \\ grad_{max}, & grad > grad_{nom} \end{cases}.$$

Aber auch diese Formulierung wird nur in Verbindung mit eindeutigen Bedingungen zum gewünschten Ergebnis führen. Zunächst muss dem Anwender bewusst sein, dass eine passende Problematik vorliegt, z.B. ein Grauwertverlauf wie in Abbildung 4.18.

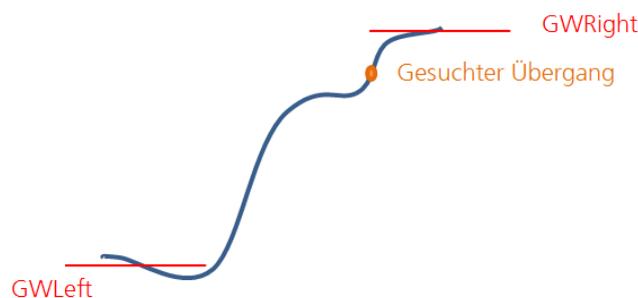


Abbildung 4.18: Grauwertübergang mit festem gesuchten Gradienten

Eine solche Gradientenbeschränkung nach oben führt jedoch auch nicht automatisch zum gesuchten zweiten Übergang. Dazu ist eine weitere Information, z.B. der Abstand zu einem nominalen Grauwert, notwendig. Das kann sowohl der Grauwert-

unterschied als auch der räumliche Abstand zum Bereich von  $GW_{nom}$  sein. Zusammenfassend muss hierfür eine Energiekombination eingesetzt werden.

$$E_{Gradnom}(i) = \begin{cases} E_{Grad}(i) + E_{GWnom}(i), & grad \leq grad_{nom} \\ grad_{max}, & grad > grad_{nom} \end{cases}$$

Alternativ kann eine Bewertung der räumlichen Distanz zwischen den Positionen  $pos(x)$  erfolgen mit

$$E_{Dist}(i) = |pos(GW_{nom}) - pos(i)|$$

Zuletzt fehlt noch eine Energiefunktion bei Angabe eines Schwellwerts ähnlich zum Vorgehen des Marching Cubes Algorithmus. Hier muss eine gute Bewertung vorliegen, wenn der aktuelle Grauwert  $g(i)$  zwischen zwei Nachbarn liegt. Eine Möglichkeit zur Lösung lautet

$$E_{Thresh}(i) = \frac{1}{2}(g(i) - GW_{thres}) + (g(i+1) - GW_{thres}).$$

Die notwendige Form einer grauwertbasierten Energiefunktion hängt folglich stark von den Vorgaben des Anwenders und Gegebenheiten im Voxelmodell ab. Mit Ausnahme von  $E_{Thresh}$  ist jedoch für alle Formen die Maximierung des Gradienten notwendig. Bei zusätzlicher Angabe eines Materialwerts ist die Identifizierung der Art des Übergangs und die entsprechende Gradientenrichtung relevant. Dazu kann zusätzlich die räumliche Nähe bzw. Ähnlichkeit zum Materialgrauwert berücksichtigt werden. Bei der Kombination von mehreren Energien muss sichergestellt werden, dass sie entweder einen passenden Wertebereich besitzen oder alle Teilenergien normiert sind. Dies trifft vor allem auf  $E_{Dist}$  zu, da diese im Gegensatz zu den anderen genannten Energien räumliche Information als Bezugssystem hat. Da mit Blick auf die spätere Umsetzung des Verfahrens unnötige Rechenschritte vermieden werden sollen, wird zunächst auf die Verwendung von  $E_{Dist}$  verzichtet. Zusammengefasst in 4.4 werden folgende Energiefunktionen für die grauwert- oder voxelbasierte Energie  $E_{Vox}$  in Abhängigkeit der Nutzerangaben festgelegt.

Für die in der Tabelle erwähnten Gewichte gilt  $a, b, c \in [0, 1]$  und  $a + b + c = 1$ . Diese Energien können grundsätzlich für jeden Knotenpunkt anders festgelegt werden. Sinnvoll ist die Bestimmung von Punktbereichen oder -gruppen mit gleichen Anforderungen. Die weitere Nutzung von  $E_{Vox}$  erfordert eine Normierung

$$E_{VoxNorm}(i) = \frac{E_{Vox}(i) - E_{VoxMin}}{E_{VoxMax}(i) - E_{VoxMin}},$$

wobei die Minimal- und Maximalwerte  $E_{VoxMax}$  und  $E_{VoxMin}$  auf unterschiedliche Weise definiert werden können. Eine Möglichkeit ist die Skalierung bezüglich des

Nutzereingabe	Nutzerinteraktion	Energiefunktion
Keine	Keine	$E_{Vox} = E_{Grad}$
Materialwert $GW_{nom}$	Gewichte $a, b, c$ Optional: Angabe $side$	$E_{Vox} = aE_{Mat(side)} + bE_{GW_{nom}} + cE_{Grad_{nom}}$
Schwellwert $GW_{thres}$	Keine	$E_{Vox} = E_{Thresh}$

Tabelle 4.4: Festlegung der grauwertbasierten Energiefunktionen

Wertebereichs  $[0, grad_{max}]$  bei entsprechender Formulierung von  $E_{Grad}$ . Eine weitere Variante besteht in der Bestimmung der möglichen Minimal- und Maximalwerte global für das gesamte Initialdreiecksnetz. [WS92] schlägt eine lokale Form vor, indem die erreichbaren Extrema jeweils nur für die direkten Nachbarknoten bestimmt werden. Die Wahl der Methode hängt stark von der Umsetzung der Positionsvariation ab. Festzuhalten ist, dass bei der globalen Variante viel Rechenzeit benötigt wird, während die anderen keinen oder zumindest nur geringen Rechenaufwands bedarf.

### 4.5.3 Krümmungsbasierte Energiefunktion

Die Energie zur Berücksichtigung der Krümmungen kann im Prinzip direkt der eigentlichen Berechnung entsprechen. Das bedeutet für eine Energie basierend auf der Gaußkrümmung  $E_K$

$$E_K(i) = |K(p)|.$$

Der Betrag ist notwendig, da die Gaußkrümmung Werte im Bereich  $[-\infty, \infty]$  annimmt, wobei negative Werte stark gekrümmt sind. Diese Energie wird minimal bei einer geringen Krümmung, wobei sie keine Aussage über einen flachen Punkt ermöglicht. Die mittlere Krümmung lässt sich ebenfalls als Energie  $E_H$  beschreiben

$$E_H(i) = |H(p)|.$$

Ist das Ziel der Bewertung, einen möglichst flachen Punkt zu haben, sollten beide Energien zusammengefasst als  $E_{Flach}(i)$  minimal werden:

$$E_{Flach}(i) = \frac{1}{2}(E_K(i) + E_H(i)).$$

Wie zuvor beschrieben, kann dies ebenso über die Nutzung der beiden Hauptkrümmungen  $k_1, k_2$  erfolgen mit

$$E_{Flach}(i) = |k_1| + |k_2|.$$

Für das Identifizieren von Sollkrümmungen sind ebenfalls gegebene oder bestimmbar Hauptkrümmungen  $k_{1,Soll}, k_{2,Soll}$  oder alternativ Sollwerte  $K_{Soll}$  oder  $H_{Soll}$  notwendig. Initiale Modelle eignen sich beispielsweise für die Berechnung von  $k_{1,Soll}, k_{2,Soll}$ . Sind diese Informationen vorhanden, kann vorab ermittelt werden, welche Soll- und Istwerte sich mehr ähneln, und auf dieser Basis die Energie  $E_{KWnom}$  mit

$$E_{KWnom}(i) = \begin{cases} \frac{1}{2}(|k_1 - k_{1,Soll}| + |k_2 - k_{2,Soll}|) & , |k_1 - k_{1,Soll}| < |k_1 - k_{2,Soll}| \\ \frac{1}{2}(|k_1 - k_{2,Soll}| + |k_2 - k_{1,Soll}|) & , |k_1 - k_{1,Soll}| \geq |k_1 - k_{2,Soll}| \end{cases}$$

definiert werden. Analog lässt sich  $E_{KWnom}$  mit gegebenen Werten für beide oder eine der Krümmungen  $K$  und  $H$  bestimmen, also

$$E_{KWnom}(i) = \frac{1}{2}(|K - K_{Soll}| + |H - H_{Soll}|).$$

Bei relativen Sollangaben ist es nicht ohne Einschränkungen möglich, eine einzige Energie zu formulieren. Prinzipiell lassen sich Anforderungen an die Werte für  $k_1, k_2$  durch ein Vielzahl an Zusatzbedingungen einbringen, z.B. eine Einschränkung ähnlich wie bei  $E_{Gradnom}(i)$ . Obwohl sie sich sowohl auf die Gaußkrümmung als auch auf die mittlere Krümmung beziehen können, ist es für den praktischen Einsatz sinnvoll, die entsprechenden Eigenschaften für die einzelnen Hauptkrümmungen zu formulieren. Das kann die Forderung nach einer möglichst runden Form, also  $k_1 \approx k_2$ , oder nach einem Flachpunkt, also  $k_1 = 0$  oder  $k_2 = 0$ , sein. Für die Krümmung ist, anders als bei den Grauwerten, kein Maximalwert  $KW_{max}$  vorab bekannt. Er kann jedoch durch Einschränkung des Suchbereichs ermittelt werden, denn dadurch ist die Positionsvariation und damit die Extrema der Knotenpositionen beschränkt. Daraus ergibt sich für relative Sollinformationen eine mögliche Form für eine bedingte Energie  $E_{KWrel}(i)$  mit

$$E_{KWrel}(i) = \begin{cases} E_{Flach}(i) & , \text{Bedingung erfüllt} \\ KW_{max} & , \text{Bedingung nicht erfüllt} \end{cases}$$

Um sicherzustellen, dass die Bedingung innerhalb des Suchbereichs erfüllt werden kann, sollte eine entsprechende, gegebenenfalls anpassbare Toleranz  $tol$  eingeführt werden. Trotzdem ist diese Formulierung noch sehr allgemein und muss für die Umsetzung spezifiziert werden. Das bedeutet, die Definition einer praxisrelevanten Auswahl an Bedingungen ist notwendig. Da die Suche nach einem Flachpunkt bereits

durch die Suche nach Glattheit abgedeckt ist, entfällt  $k_1 = k_2 = 0$ . Die Forderung einer einzigen Sollkrümmung lässt sich durch eine zusätzliche binäre Gewichtung  $s, t \in \{0, 1\}$  bei  $E_{KWnom}(i)$  ermöglichen

$$E_{KWnom}(i) = \begin{cases} \frac{1}{2}(s \cdot |k_1 - k_{1,Soll}| + t \cdot |k_2 - k_{2,Soll}|) & , |k_1 - k_{1,Soll}| < |k_1 - k_{2,Soll}| \\ \frac{1}{2}(s \cdot |k_1 - k_{2,Soll}| + t \cdot |k_2 - k_{1,Soll}|) & , |k_1 - k_{1,Soll}| \geq |k_1 - k_{2,Soll}| \end{cases}$$

oder alternativ

$$E_{KWnom}(i) = s |K - K_{Soll}| + t |H - H_{Soll}|.$$

Schließlich lassen sich folgende Bedingungen zur Abdeckung der relevanten Möglichkeiten für die Zusammenhänge der beiden Hauptkrümmungen oder von Gauß- und mittlerer Krümmung festlegen:

- $k_x = k_y \pm tol$ , gleichbedeutend mit  $K = H^2 \pm tol$ .
- $k_x < k_y \pm tol$
- $k_x < k_{x,Soll}$
- $k_x > k_{x,Soll}$
- $K > K_{Soll}$ , analog  $H > H_{Soll}$
- $K < K_{Soll}$ , analog  $H < H_{Soll}$

Die Kombination von relativen Sollvorgaben bezüglich der hier behandelten Formen der Krümmung kann ebenfalls sinnvoll sein, z.B. wenn eine bestimmte geometrische Form ohne Größenvorgabe gesucht wird. Unter der Voraussetzung, dass die Bedingung erfüllt ist, wird erneut nach der kleinsten Krümmung gesucht, da auch hier die Gewährleistung von Glattheit eine entscheidende Rolle spielt. In Tabelle 4.5 werden folgende Energiefunktionen für die krümmungsbasierte Energie  $E_{Curv}$  in Abhängigkeit der Nutzerangaben zusammengefasst festgelegt.

Auch für  $E_{Curv}$  ist die Festlegung der Normierung unverzichtbar. Da hier keine festen Grenzen der Wertebereiche existieren, müssen die Normierungswerte  $E_{CurvMax}$  und  $E_{CurvMin}$  für

$$E_{CurvNorm}(i) = \frac{E_{Curv}(i) - E_{CurvMin}(i)}{E_{CurvMax}(i) - E_{CurvMin}(i)}$$

aus dem vorliegenden Netz bestimmt werden. Wie bereits bei der Bestimmung von  $KW_{max}$  können ausgehend von den Möglichkeiten der Positionsvariation im Suchbereich für jeden Punkt die maximalen und die minimalen Werte für  $E_{Curv}$  bestimmt werden. Aus diesen können entweder die globalen Extrema herangezogen werden oder erneut nach [WS92] nur die direkte Nachbarschaft betrachtet werden.

Nutzereingabe	Nutzerinteraktion	Energiefunktion
Keine	Keine	$E_{Curv} = E_{Flach}$
Sollkrümmungen $k_{1,Soll}, k_{2,Soll}$ oder $K_{Soll}, H_{Soll}$	binäre Gewichte $s$ und $t$	$E_{Curv} = E_{KWnom}(i)$
Bedingung	Toleranzwert $tol$	$E_{Curv} = E_{KWrel}(i)$

Tabelle 4.5: Festlegung der krümmungsbasierten Energiefunktionen

#### 4.5.4 Aufstellen der Gesamtenergiefunktion

Verschiedene bestimmte Energien müssen schließlich zur Bewertung einer Knotenposition zu einem Wert  $E(i)$  zusammengefasst werden. Dies führt mit den beiden hier genutzten Funktionen zu

$$E(i) = u_i \cdot E_{VoxNorm}(i) + v_i \cdot E_{CurvNorm}(i),$$

wobei für die Gewichte  $u_i$  und  $v_i$  gilt  $u_i, v_i \in [0, 1]$  und  $u_i + v_i = 1$ . Da es sich bei der Ermittlung von Oberflächendaten aus CT-Volumina zumeist um messtechnische Anwendungen oder sonstige Aufgaben mit Bedarf an präzisen Ergebnissen handelt, ist darauf zu achten, dass der Einfluss der Krümmung keinen negativen Effekt auf die grauwertbasierte Grenzsuche hat. Diese spielt nämlich eine wesentliche Rolle, da sie auf den zugrunde liegenden realen Bauteilinformationen basiert. Die Krümmung hingegen hat die Initialoberfläche als Ausgangspunkt, welche keine Istinformationen des zu untersuchenden Objekts zwingend beinhalten muss. Trotzdem ist die Krümmungsenergie ein wichtiges Element in der Gleichung. Unsicherheiten bei der Grauwertbetrachtung, z.B. wie in Abbildung 4.12, können über Krümmungen gesteuert werden. Darüber hinaus dienen sie der Begrenzung der Oberflächenvariation bezüglich der Geometrien. Diese Tatsachen zeigen, dass die Wahl der Gewichte  $u_i, v_i$  sehr kritisch ist. Sie lassen sich zwar für jeden Punkt separat wählen, dies ist aber für die manuelle Eingabe nicht praktikabel. Hierzu sollten Punkte zu Gruppen zusammengefasst werden, z.B. anhand der initialen Bereichsauswahl. Eine lokale Anpassung einzelner Punkte kann jedoch zusätzlich automatisch erfolgen. Liegt beispielsweise die Energie  $E_{VoxNorm}(i)$  auch in ihrem Minimum noch oberhalb einer definierten Schwelle, kann die Gewichtung  $E_{CurvNorm}(i)$  erhöht werden um die eventuell bessere Positionierung der Nachbarknoten zu nutzen. Bei dieser Schwelle handelt es sich um eine absolute oder relative Größe, die wiederum vom Anwender vorgegeben wird.

Dieses Vorgehen kann sinnvoll für die Überwindung von artefaktbehafteten Stellen im Voxelmmodell sein, an denen keine ausreichende Grenzfindung möglich ist.

Genau wie die Vielzahl an Möglichkeiten der Aufgabenstellungen, so sind auch beliebige Formen an Energiefunktionen möglich. Für die Praxis der industriellen CT und deren Anwendungsgebiete ist jedoch die Ermittlung der genauen Grauwertschwellen wesentlich. Die Betrachtung der Krümmung ist zusätzlich notwendig, um einerseits Schwächen der grauwertbasierten Grenzsuche zu überwinden und um andererseits die Suche nach bestimmten geometrischen Kriterien zu steuern. Diese theoretischen Energieformeln gilt es in der Umsetzung und Evaluation auf ihre Relevanz und Tauglichkeit für den praktischen Einsatz zu überprüfen.

### 4.6 Positionsvariation und Suchbereiche

Die beschriebenen Arten von Vorwissen und ihre Formulierung als Energiefunktion werden benötigt, um die optimale Position aller Dreiecksknoten in einem Suchbereich zu ermitteln. In diesem Abschnitt wird die Wahl der Form des Suchbereichs sowie die Möglichkeit der Variation der Knotenpositionen oder sonstiger Veränderungen bezüglich des initialen Netzes betrachtet.

#### 4.6.1 Wahl der Form des Suchbereichs

Der Suchbereich legt zum einen fest, welche Voxel für die Grenzsuche betrachtet werden, und schränkt zum anderen die Veränderbarkeit der Initialoberfläche ein. Je näher die Initialisierung an der realen Grenzfläche liegt, desto kleiner ist der Suchbereich wählbar und desto zuverlässiger die Ergebnisse. Der Ausgangspunkt des zu definierenden Bereichs ist also ein Punkt  $p_i \in \mathbb{R}^3$  und der dazugehörige Voxel  $v(p_i) \in \mathbb{N}^3$  im diskreten Volumenmodell. Die zu betrachtende Umgebung kann entweder ein-, zwei oder dreidimensional sein. Bei der Betrachtung der Voxel und Grauwertverteilung des gesamten umgebenden Raums ist die Bestimmung von Gradienten mit weiteren Anforderungen und Verarbeitungsschritten verbunden. Dies ist ebenso bei 2D-Umgebungen notwendig. Hierzu sind klassische 2D- und 3D-Filter einsetzbar, die zu maximalen Gradienten führen und sich damit als Grundlage für die Energiefunktionen eignen. Für die Nutzung von zweidimensionalen Bereichen ist außerdem die Wahl der Schnittebene entscheidend. Ist die Normale zum Punkt gegeben, eignet sich die Normalenrichtung als eine Basisrichtung, da davon auszugehen ist, dass sich bei einer zumindest grob eingepassten Initialoberfläche, die Grenze entlang der Normalenrichtung repräsentiert. Im Gegensatz zu den 2D- und 3D-Suchbereichen, ist die Auswertung von eindimensionalen Grauwertprofilen wesentlich effizienter. Die Berechnung von Gradienten oder die Anwendung von Glättungs- oder Interpolationsschritten ist hier trivial umsetzbar und erfordert deutlich weniger Rechenaufwand. Darüber hinaus ist der geringere Speicherbedarf als Vorteil für die spätere

Umsetzung zu nennen. Auch hier ist die Richtung des Grauwertprofils von großer Bedeutung und erneut ist die Normalenrichtung die offensichtliche Wahl. Ist diese nicht gegeben, lässt sich eine gute Näherung beispielsweise mit Hilfe einer Ausgleichsebene durch die Nachbarpunkte bestimmen. Grundsätzlich kann eine Profilrichtung beliebig sein und mittels Optimierungsverfahren ideal bestimmt werden. Dies kann durch Vergleich der Kontrastverteilungen oder Gradientenstärken unter verschiedenen Winkeln geschehen und vor allem in Regionen, die nicht stetig differenzierbar sind, wie Ecken und Kanten zu einer verbesserten Ergebnisqualität beitragen, siehe Abbildung 4.19. Eine Lösung stellt erneut die Nutzung von Krümmungen dar. Bei Bereichen mit einer starken Krümmung kann eine Analyse der Normalenrichtungen erfolgen und eine Mittelung aus diesen genutzt werden.

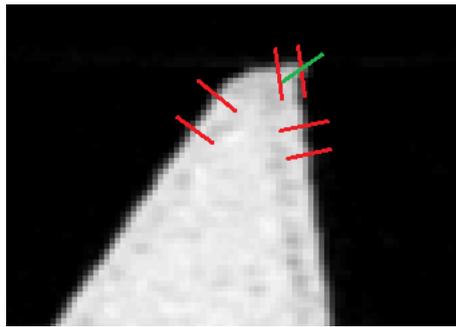


Abbildung 4.19: Profilrichtungen entlang der Oberflächennormalen der initialen Kontur in Rot mit sichtbarer Problematik an der oberen rechten Ecke durch einen nicht stetig differenzierbaren Verlauf. Die geeignete Profilrichtung ist grün eingezeichnet.

Unabhängig von der Wahl der Profilrichtung ist diese nur in Spezialfällen parallel zu einer Achsrichtung des Voxelmodells. Für das Befüllen mit Grauwerten ist folglich deren Bestimmung aus den CT-Daten erforderlich. Das einfachste und bekannteste Verfahren ist der Bresenham-Algorithmus [Bre65], der zum Zeichnen von Linien in digitalen Bildern entwickelt wurde. Er berechnet, welche geschnittenen Pixel als zur Linie zugehörig definiert werden, siehe Abbildung 4.20 für den 2D-Fall und lässt sich leicht in den 3D-Raum übertragen. Hier lässt er sich zur Bestimmung der Grauwert-

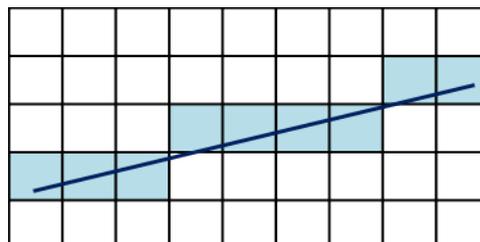


Abbildung 4.20: Bresenham Algorithmus für eine Linie im 2D Pixelraster

te des Profils verwenden. Eine alternative Variante ist bei [Ste05] zu finden. Hier wird das Voxelmodell als ein Gitter mit den Mittelpunkten der Voxel als Knoten

angenommen. Für eine Profillinie werden alle Durchstoßpunkte durch dieses Gitter, also Schnittpunkte mit den Gitterlinien, berechnet und die Grauwerte auf Basis der Nachbarn linear interpoliert. Im 3D-Fall bedeutet dies eine bilineare Interpolation von vier benachbarten Voxeln, da sich ein Durchstoßpunkt sicher in einer Ebene zwischen den Voxeln in einer Dimension befindet. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass durch die Interpolation der Grauwerte die Genauigkeit durch Nutzung lokaler Informationen verbessert wird. Außerdem liefern die Durchstoßpunkte die Länge der Durchdringung für jeden Voxel, was bei der Positionsvariation zusätzlich Verwendung findet. In Abbildung 4.21 sind die Ergebnisse beider Vorgehensweisen verglichen, exemplarisch für ein 2D-Beispiel.

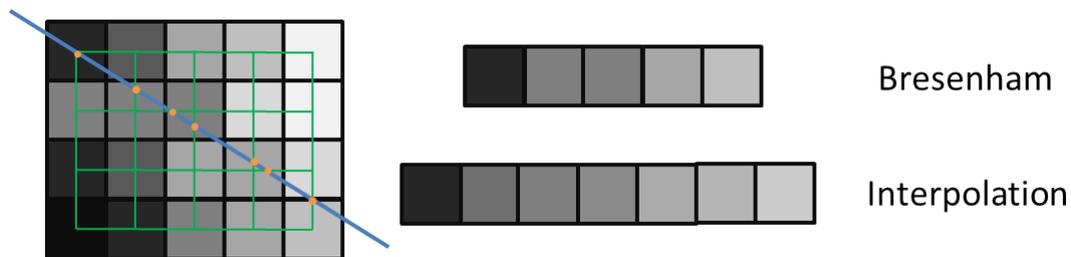


Abbildung 4.21: Vergleich der entstehenden Grauwertprofile für eine Linie (blau) mit dem Bresenham Algorithmus oder mit Interpolation über ein Gittermuster.

Es wird deutlich, dass bei letzterem alle direkten Nachbarn berücksichtigt werden und somit ein größeres Profil entsteht. Der Bresenham-Algorithmus lässt sich auch im 3D-Fall leicht und effizient berechnen, während die Bestimmung der Durchstoßpunkte und die Interpolation deutlich mehr Schritte benötigen, jedoch zu besseren Ergebnissen führt.

### 4.6.2 Positionsvariation

Die Richtung der Grauwertprofile ist gleichzeitig die Bewegungsrichtung eines Knotens. Die Erstellung der Profile und die Art der Positionsveränderung hängen direkt zusammen und müssen folglich aufeinander abgestimmt sein. Ein Knoten kann seine Position  $p$  entlang des normierten Bewegungsvektors  $\vec{v}$  verändern. Eine neue Position  $p_{neu}$  wird beschrieben durch

$$p_{neu}(i) = p(i) + t \cdot \vec{v}(i),$$

wobei es sich bei  $t$  um den Längenfaktor handelt, also die Schrittweite des iterativen Vorgehens. Dieser ist so zu wählen oder zu bestimmen, dass die Positionen sinnvoll zu den Grauwertprofilen passen. Sind die Profile mit Hilfe des Bresenham-Algorithmus ermittelt worden, muss die dazugehörige Position mindestens innerhalb des Voxel liegen, was sich über eine konstante, durchschnittliche Schrittweite näherungsweise realisieren lässt. Dieses Vorgehen ist jedoch derart vage, dass es für messtechnische

Anforderungen nicht ausreichend erscheint. Die interpolierte Variante liefert wie bereits erwähnt direkt die Längen der Anteile einer Linie zwischen den Voxelgrenzen und dem Ausgangswert. Diese können als Verschiebungsfaktoren  $t_j$  verwendet werden. Der Index  $j$  ist der Zähler über die Grauwertprofilelemente. Es folgt

$$p_{neu}(i, j) = p(i) + t_j \cdot \vec{v}(i).$$

In Abbildung 4.22 sind diese Längen für das bekannte Beispiel dargestellt. Der Ausgangspunkt liegt hierbei in der Mitte, was für die Parameter  $t_1$  bis  $t_3$  ein negatives Vorzeichen bedeutet. Soll eine andere Form der iterativen Variation genutzt werden,

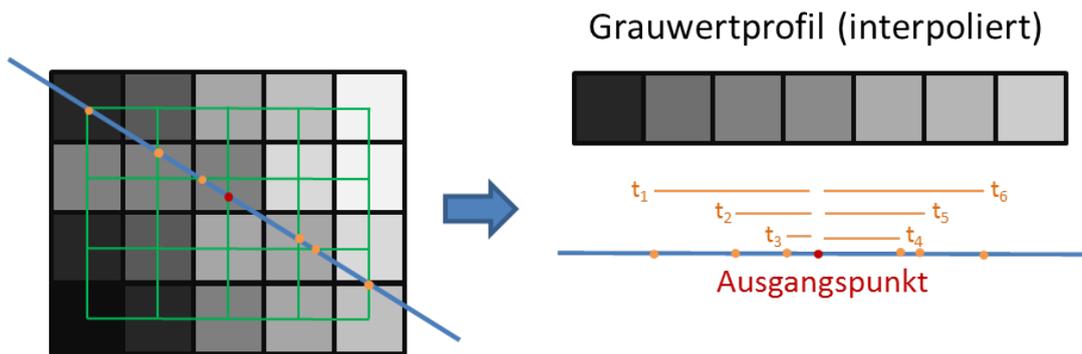


Abbildung 4.22: Zum Grauwertprofil der blauen Linie zugehörige Längen  $t_j$  in orange muss das Grauwertprofil passend bestimmt werden. Möchte man beispielsweise eine konstante Schrittweite im Bereich des gewünschten Detailgrads für die Suche, ist eine weiterführende Grauwertinterpolation notwendig. Darauf wird in Abschnitt 4.7 näher eingegangen.

Bei der Variation der Position eines Knotens ist nicht nur die einzelne Bewegung zu beachten, sondern ebenso das Zusammenspiel aller Veränderungen. Während davon ausgegangen werden kann, dass die initiale Oberfläche topologisch korrekte Dreiecksverbindungen aufweist, kann dies bei der Variation nicht ohne weiteres garantiert werden. Da lediglich die Knoten verändert werden, dabei jedoch die Kanten bestehen bleiben sollen, können leicht Degenerationen des Netzes auftreten. Es muss also auf Überkreuzungen der Profile geachtet werden. Dabei spielt die Gesamtgröße sowie die Richtung der Profile eine wesentliche Rolle. Eine Möglichkeit ist, dass keine Annäherungen von Bewegungsbereichen bis zu einer festen Grenze erlaubt werden. Ein sphärischer Bereich um einen Knoten mit dem Durchmesser der Profilgröße darf hierbei keine Überschneidungen mit anderen solchen umgebenden Kugeln aufweisen. Um dadurch keine Einschränkungen in der Punktedichte in Kauf nehmen zu müssen, können parallele Bewegungsvektoren außen vor gelassen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Vorabanalyse der Initialkontur zur Identifizierung von Risikobereichen. Dazu zählen Bereiche mit geringen Wandstärken, sodass Durchdringungen

der Wände bei zu großen Profilen möglich sind, oder Kanten und Ecken, die wie oben beschrieben durch ungeeignete Bewegungsrichtungen, ebenso ungeeignete Positionen einnehmen können. Ersteres lässt sich teilweise innerhalb der Profile erkennen, wenn unerwünschterweise zwei Objektgrenzen vorhanden sind. Um jedoch eine Sicherheit zu haben, sollte ein Profil nicht über die Hälfte der Wandstärke hinausgehen. Eine normalenrichtungs-basierte Bestimmung der Wandstärken für Gruppen von Knoten des Netzes kann als Grundlage für eine maximale Profilgröße dienen. In Abbildung 4.23 sind die Wandstärken für einige Punkte der Initialoberfläche eingezeichnet. Die Hälfte der kürzesten Länge gibt hier folglich ein gutes Indiz für eine geeignete Obergrenze für die Profilgröße.

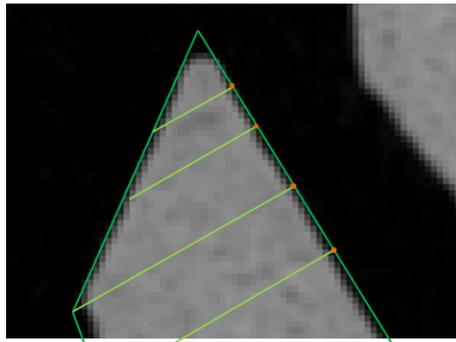


Abbildung 4.23: Voxeldaten mit überlagerter Sollkontur (dunkelgrün) und Abschätzungen der Wandstärken für einige Knoten (orange) basierend auf der Normalenrichtung

Die Problematik bei Knoten mit starker Krümmung lässt sich bereits mit der angepassten Wahl der Bewegungsrichtung verbessern. Sie weisen aber nach wie vor ein Potential für Degenerierung auf. An diesen Stellen ist die Überprüfung von möglichen Profilüberkreuzungen, z.B. wie oben beschrieben, sinnvoll und notwendig. Diese Maßnahmen zur Herstellung der topologischen Garantie sollten sich jedoch im Allgemeinen durch eine ausreichend gute Initialisierung, angemessene Energiefunktionen und passende Aufstellung der Grauwertprofile erübrigen.

Ein weiterer Aspekt der Positionsvariation ist die Frage der Profilveränderbarkeit. Bei den klassischen Aktiven Konturen wird für jeden Iterationsschritt von einer Neuberechnung der Umgebung ausgegangen. Für die verwendeten Grauwertprofile bedeutet dies, dass jeweils die neue Position als Ausgangspunkt für ein neues Grauwertprofil dient. Dieses Vorgehen ermöglicht, dass auch eine von der Initialisierung entfernte Grenze gefunden werden kann, auch wenn sie nicht im initialen Suchbereich liegt und erlaubt die Nutzung eines kleinen Profils. Dies hat jedoch den Nachteil, dass die Berechnung aufwendig ist und die Gefahr für Überschneidungen steigt. Liegt die initiale Oberfläche bereits in der Nähe, ist ein festes Profil mit angemessener Größe zu bevorzugen. Hier ist als Nachteil der größere Speicherbedarf zu nennen. Sollte es

vorkommen, dass innerhalb eines Profils keine ausreichend deutliche Grenze gefunden wird, ist entweder eine Vergrößerung des Profils oder eine Neuberechnung mit angepasster Ausgangsposition notwendig.

### 4.6.3 Topologische Variationsmöglichkeiten

In den bisherigen Erläuterungen wurde stets von einer feststehenden Initialoberfläche ausgegangen. Das heißt, es finden keine Veränderungen bezüglich der Knotenanzahl und -dichte statt. Wie in 3.1.5.3 und 3.1.5.4 gezeigt, sind Veränderungen der Topologie aber durchaus anwendbar und praktisch sinnvoll. Dies trifft hauptsächlich zu, wenn die Initialisierung sehr grob ist und in ihrer Form nicht der gesuchten Oberfläche entspricht. Hier wird davon ausgegangen, dass das gegebene Dreiecksnetz schon eine ausreichend gute Repräsentation der Grenzfläche darstellt. Trotzdem können natürlich Spaltungen im Netz aufgrund von Defekten am Bauteil notwendig sein. Außerdem kann eine Vervielfältigung von Knoten an stark gekrümmten Stellen zu einer verbesserten Ergebnisqualität führen. Bei dem hier verwendeten Verfahren soll letzteres bereits bei der Initialisierung entsprechend bedacht sein. Das Entfernen von Knoten kann jedoch durchaus ermöglicht werden, z.B. wenn keine geeignete Grenze gefunden wird. Dies sollte zusätzlich vom Nutzer erlaubt bzw. verboten werden können.

## 4.7 Möglichkeiten der Interpolation

In den vorherigen Abschnitten wurde bereits mehrfach die Interpolation erwähnt. Alle bisherigen Betrachtungen basierten auf den diskreten Grauwerten des Voxelmodells. Das bedeutet, dass lediglich die Genauigkeit der Voxelauflösung verwendet wird. Es bedarf einer subvoxelgenauen Suche, um die Möglichkeiten der Oberflächenbestimmung vollständig auszunutzen. Beim Marching Cubes Algorithmus wird dies durch lineare Interpolation entlang der Gitterkanten erreicht. Im Gegensatz dazu steht bei dem hier vorgestellten Verfahren jedoch im Allgemeinen kein Schwellwert zur Verfügung, der als Interpolationsfaktor genutzt werden kann. Angelehnt an [Ste05] ist ein lokaler Schwellwert aus den Nachbarn bestimmbar. Dazu müssen alle Grenzvoxel bereits gradientenbasiert detektiert sein. Da hier mit den verschiedensten Anforderungen an die Oberfläche gearbeitet wird, ist dieses Vorgehen nur in einigen Fällen passend und sinnvoll anwendbar. Dafür ist es jedoch möglich, die Grauwerte derart zu interpolieren, dass sie direkt in die schrittweise Energieminimierung einfließen können.

### 4.7.1 Anwendung im Grauwertprofil

Die aufgabenbasierte Oberflächenfindung soll nach Definition dem Nutzer ermöglichen, die Auflösung der Grauwerte festzulegen. Dies kann an dieser Stelle durch

Eingabe der kleinsten Schrittweite  $r$  der Interpolation geschehen. Der Wert von  $r$  muss sinnvoll in Zusammenhang mit der gegebenen Voxelauflösung  $res$  in Verbindung stehen. Beispielsweise sollte  $r < res$  gelten. Eine weitere Bedingung ergibt sich aus der Art der Anwendung im Grauwertprofil. Die naheliegende und korrekte Gewinnung der Grauwertinformationen ist die Interpolation aus den angrenzenden Nachbarvoxeln analog zum Vorgehen bei der Erstellung der Grauwertprofile. Da es sich hierbei jedoch nicht nur um die Durchstoßpunkte der angenommenen Voxelgitterstruktur handelt, ist anstelle einer bilinearen eine trilineare Interpolation notwendig. Anstelle von vier müssen folglich acht Nachbarvoxel in den entsprechenden Relationen berücksichtigt werden. Da mit dem Grauwertprofil bereits eine auf den Nachbargrauwerten basierende zweidimensionale Näherung sowie die Durchdringungslängen zur Verfügung stehen, ist die Nutzung dieser Information zur Einsparung von Rechenzeit und zur Vermeidung von redundanten Interpolationsschritten an dieser Stelle sinnvoll. Aus diesem Grund soll im Folgenden das Grauwertprofil als Funktion betrachtet werden, wobei die Grauwerte als Funktionswerte  $g$  und die Durchdringungslängen  $t$  als Abszissen dienen. In Abbildung 4.24 ist diese Übertragung dargestellt. Die Grenzen der einzelnen Grauwerte werden jeweils bei der Hälfte der Durchdringungslängen gewählt.

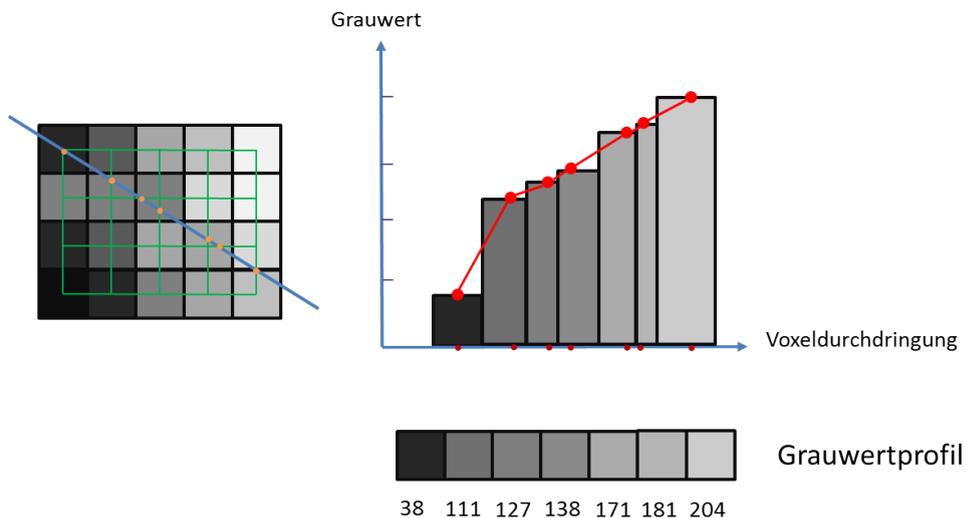


Abbildung 4.24: Ausgangssituation (links), aufgetragenes Grauwertprofil mit resultierender stückweise linearen Funktion in rot (rechts)

Ausgehend von dieser Darstellung lassen sich verschiedene Formen der Interpolation anwenden, von denen die leicht umsetzbaren und praxisnahen Varianten in den nachfolgenden Abschnitten für das vorliegende Verfahren aufgezeigt werden. Um die neuen Grauwerte wiederum in das Profil zu übertragen, wird die angegebene Unterteilung  $r$  benötigt. Diese sollte über den gesamten Profilbereich ungefähr gleichmäßig verteilbar sein. Idealerweise gilt  $(|t_0| + |t_m|) \% i = 0$ . Für jeden neuen Abschnitt lässt sich ein Grauwert bestimmen und in das Grauwertprofil übertragen. Da dies jedoch

zu sehr großen Datenmengen führt, die bei der iterativen Positionsvariation verarbeitet werden müssen, eignet sich ein zweistufiges Vorgehen. Dabei wird zunächst im ursprünglichen voxelbasierten Grauwert der passende Voxel identifiziert und ein kleinerer Bereich feiner interpoliert. In Abbildung 4.25 sind die beschriebenen Profilerstellungen beispielhaft aufgezeigt.

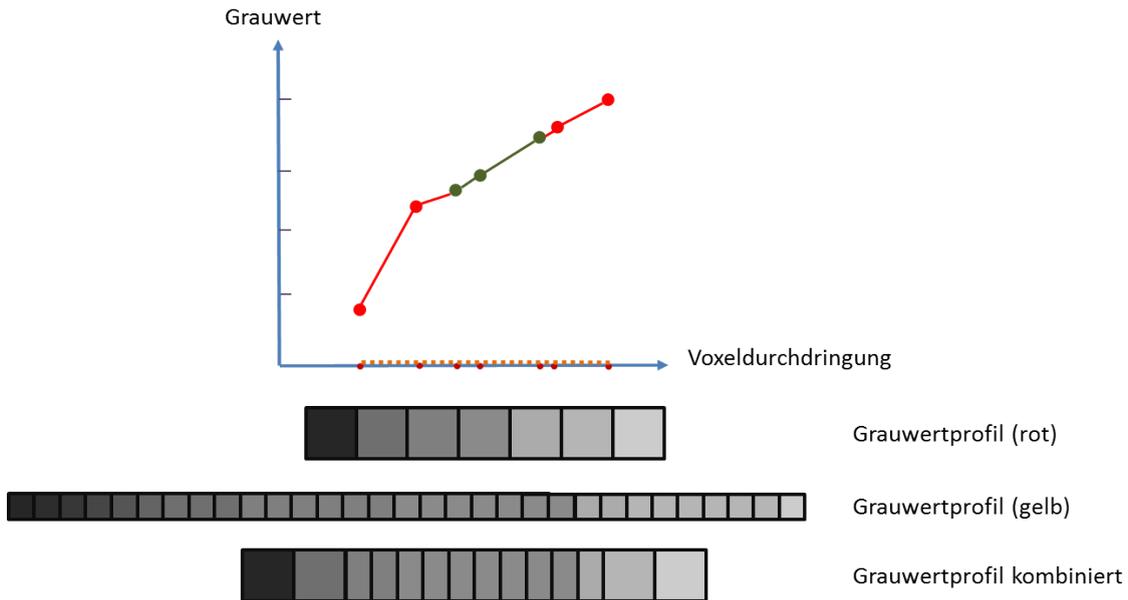


Abbildung 4.25: Übertragung der Interpolation und Grauwertprofile bei grober, feiner und kombinierter Unterteilung

Die zweistufige Variante ist als kombiniertes Grauwertprofil dargestellt, bei dem der grüne Anteil der Funktion gemäß der Unterteilung  $r$  verfeinert wurde. Bei einem solchen Vorgehen muss die Speicherung der Abschnittslängen entsprechend angepasst werden. Alternativ ist eine tatsächliche zweistufige Berechnung sinnvoll, wobei ein neues, verfeinertes Profil für einen kleineren Suchbereich bestimmt wird.

## 4.7.2 Lineare Interpolation

Die einfachste Form der Interpolation ist die lineare. Ein Beispiel für die stückweise lineare Interpolation des Grauwertprofils ist in 4.25 zu sehen. Vorteilhaft ist hier hauptsächlich die einfache und schnelle Berechnung. Jedoch überwiegen bei der vorliegenden Anwendung die Nachteile. Zum einen ist das Resultat nicht stetig differenzierbar, was dazu führt, dass keine gleichmäßige Grauwertvariation um die bekannten Stützstellen möglich ist. Zum anderen entsteht durch die Linearität in den einzelnen Abschnitten keine Variation für die Gradienten. Diese sind zwischen zwei Stützstellen für jegliche gleichmäßige Unterteilung konstant. Folglich ist eine gradientenbasierte Energiefunktion nicht geeignet, um die Unterteilung zu bewerten. Setzt sich die Gesamtenergie aus mehreren Komponenten zusammen, werden lediglich die nicht gradientenbasierten Teile für die Bewertung eine Rolle spielen. Die

lineare Interpolation eignet sich folglich nur für gradientenunabhängige Energien. Sie ist jedoch effizient und schnell berechenbar.

### 4.7.3 Logarithmische Interpolation

In Anlehnung an das Wissen der exponentiellen Intensitätsabnahme von Röntgenstrahlung in Material lässt sich annehmen, dass eine logarithmische Form der Interpolation der Grauwertverläufe der Realität nahe kommt. Die einfachste Form, die Verbindung zweier gegebener Funktionswerte  $f(a)$  und  $f(b)$  zu beschreiben, ist

$$f(x) = f(a) \exp \frac{(x - a)(\ln f(b) - \ln f(a))}{b - a}.$$

Diese Formel ergibt sich aus der logarithmischen Regression

$$y = \alpha + \beta \cdot \ln x,$$

wobei  $\alpha$  und  $\beta$  durch die beiden gegebenen Stützstellen bestimmt werden. Dieses Vorgehen lässt sich auf das vorliegende Grauwertprofil stückweise anwenden. Dies hat zwar den Vorteil, dass die Unterteilung nicht gleichmäßig interpoliert und damit die Anwendung der Gradientenbewertung möglich ist, allerdings liegt wiederum keine stetige Differenzierbarkeit an den Stützpunkten vor.

### 4.7.4 Kubische Hermite-Interpolation

Die Hermite-Interpolation ist eine Variante der Interpolation, die Stetigkeit der Übergänge fordert. Das bedeutet, dass ebenfalls alle Ableitungen bis zu einer bestimmten Ordnung  $k$  berücksichtigt werden, also entsprechend eine  $C^k$  Stetigkeit vorliegt. Es ist üblich, die Hermite-Interpolation auf Basis der dazugehörigen Bézierpunkte  $b_j$  über dem Zwischenintervall  $[a, b]$  der ursprünglichen Stützpunkte  $q_a$  und  $q_b$  zu beschreiben [PBP02]. Es gilt

$$b_j = \sum_{i=0}^j \binom{j}{i} \frac{(b-a)^i}{n \cdots (n-i+1)} q_a^{(i)}$$

und

$$b_{n-j} = \sum_{i=0}^j \binom{j}{i} \frac{(a-b)^i}{n \cdots (n-i+1)} q_b^{(i)},$$

wobei  $n = 2k + 1$  gilt. Für die kubische Hermite-Interpolation bei Berücksichtigung der ersten Ableitung ergibt sich folglich

Diese Form der Interpolation, zu sehen in Abbildung 4.26, lässt sich stückweise auf ein beliebige Profilverläufe anwenden und eignet sich aufgrund der guten Umsetzbarkeit sehr gut für die vorliegende Problemstellung. Als Ergebnis liegt eine konti-

$$\begin{aligned}
 b_0 &= q_a \\
 b_1 &= q_a + \frac{b-a}{3} q'_a \\
 b_2 &= q_b - \frac{b-a}{3} q'_b \\
 b_3 &= q_b
 \end{aligned}$$

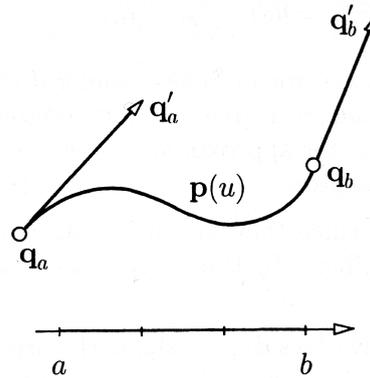


Abbildung 4.26: Prinzip der kubischen Hermite-Interpolation (Quelle [PBP02])

nuierliche, stetige Bézierdarstellung vor. Da die erste Ableitung üblicherweise nicht vorhanden ist, schlägt [PBP02] eine Schätzung durch Approximation einer quadratischen Funktion vor. Hiernach bestimmt sich die erste Ableitung  $q'_i$  durch

$$q'_i = (1 - \alpha_i) \frac{|q_i - q_{i-1}|}{|u_i - u_{i-1}|} + \alpha_i \frac{|q_{i+1} - q_i|}{|u_{i+1} - u_i|},$$

wobei

$$\alpha_i = \frac{|u_i - u_{i-1}|}{|u_i - u_{i-1}| + |u_{i+1} - u_i|}.$$

Bei  $u_i$  handelt es sich um die jeweiligen Abszissen. Für die Endpunkte wird folgendes angenommen

$$q'_0 = 2 \frac{|q_1 - q_0|}{|u_1 - u_0|} - q'_1, q'_m = 2 \frac{|q_m - q_{m-1}|}{|u_m - u_{m-1}|} - q'_{m-1}.$$

Eine zweite, alternative Form der Bestimmung von Ableitungen besteht in der einfachen Richtungsermittlung bezüglich des vorangehenden Punkts, also

$$q'_i = \frac{q_i - q_{i-1}}{u_i - u_{i-1}},$$

$$q_0 = q_m = 0.$$

Diese Näherungen der Ableitungen eignen sich beide prinzipiell für das zu entwickelnde Verfahren und sind direkt umsetzbar, da alle notwendigen Informationen zur Verfügung stehen.

Die resultierende parametrische Kurve liegt schließlich stückweise vor als

$$f(x) = f(a)u_a(x) + f(b)u_b(x) + (b - a)(f'(a)v_a(x) + f'(b)v_b(x))$$

mit

$$\begin{aligned} u_a(x) &= (1 + 2s)(1 - s) \\ u_b(x) &= (3 - 2s)s^2 \\ v_a(x) &= s(1 - s)^2 \\ v_b(x) &= -s^2(1 - s) \end{aligned}$$

und

$$s = \frac{x - a}{b - a}$$

für  $x \in [a, b]$ .

Für die Interpolation der Grauwerte in den Profilen ergibt sich eine  $C^1$ -stetige, parametrische Darstellung, die sich problemlos mit Hilfe dieser Formel beliebig unterteilen lässt. Das Ergebnis der stückweise kubischen Hermite-Interpolation für solch ein Grauwertprofil ist in Abbildung 4.27 zu sehen.

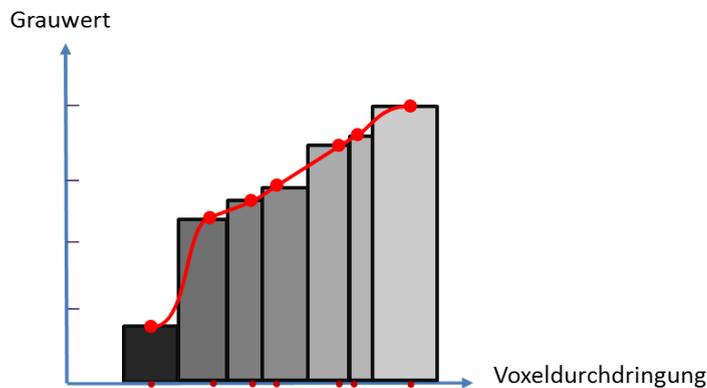


Abbildung 4.27: Verlauf des Grauwertprofils kubisch hermit-interpoliert

### 4.7.5 Bewertung der Interpolationsmöglichkeiten

Es existiert noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Interpolation der Grauwertprofile, z.B. B-Splines verschiedener Ordnung, Lagrange oder Newton-Interpolation. Für die vorliegende Anwendung ist jedoch ein bezüglich des Rechenaufwands und der dazugehörigen Eigenschaften angemessenes Verfahren notwendig. Die beschriebenen Interpolationsformen eignen sich alle für unterschiedliche Problemstellungen und Energiebewertungen. Dabei stellt die stückweise kubische Hermite-Interpolation die allgemein anwendbarste, jedoch aufwendigste Variante dar, während die lineare

Interpolation einfach umsetzbar, dafür jedoch in der Anwendung stark eingeschränkt ist.

## 4.8 Energieminimierung

Der abschließende Schritt des Verfahrens besteht in einer iterativen Minimierung, die zu der gesuchten Grenzfläche führen soll. Um das Vorgehen hierzu herzuleiten, muss kurz auf die Historie eingegangen werden. Bei der Minimierung der Energie handelt es sich um ein numerisches Optimierungsproblem. Die Methode der Wahl des klassischen Verfahrens ist die Optimierung mit Hilfe der Variationsrechnung nach der Euler-Lagrange Gleichung, siehe [KWT88], mit dem Aufwand  $O(n)$ , wobei  $n$  die Anzahl der Punkte ist. Dieser Ansatz weist jedoch gewisse Probleme auf, wie numerische Instabilitäten, was bereits 1988 in [ATW88] aufgezeigt wurde. Dort wird eine dynamische Programmierung vorgeschlagen, die zwar eine höhere Komplexität besitzt ( $O(nm^3)$  mit  $m$  als Größe der Nachbarschaft), jedoch zu verbessertem Verhalten der Snakes führt. [WS92] versuchte erstmals die Vorteile beider Verfahren zu verbinden und entwickelte eine Greedy Variante, die mit einem Aufwand von  $O(nm)$  zu numerisch stabilen Ergebnissen führte. Für jeden Knotenpunkt erfolgt die Normierung der Energieberechnung lediglich in der direkten Nachbarschaft. Das bedeutet, es wird zwar nur lokal verglichen, aber auch nur lokal bewertet. Dies verhindert eine für Greedy-Algorithmen typische Kettenreaktion, bei der alle Knoten zur stärksten Grenze wandern und die Gesamtkontur zusammenschrumpft. Diese Tendenz weist auch das klassische Vorgehen auf. Eine weitere Beschleunigung der Minimierung wurde von [LY94] vorgestellt, der Fast Greedy-Algorithmus. Dieser beschleunigt das Verfahren von [WS92] durch eine Vorberechnung der lokalen Krümmung und passende Einschränkung der Positionsvariationen. Als Abbruchkriterien dienen jeweils zwei Möglichkeiten. Entweder eine maximale Anzahl an Iterationen ist erreicht oder die Anzahl der Punkte, die in der letzten Iteration bewegt wurden, unterschreitet einen festgelegten Schwellwert.

Diese Verfahren sind alle für den 2D-Fall und beliebige Positionsvariationen in  $x, y$ -Richtung optimiert. Die vorgestellte aufgabenbasierte Oberflächenfindung bietet jedoch eine andere Ausgangslage. Durch die Nutzung der eindimensionalen Grauwertprofile im 3D-Raum ist die Bewegung der Knoten einerseits eingeschränkt, andererseits handelt es sich um teilweise sehr umfangreiche Dreiecksnetze. Die große Anzahl an Punkten zwingt dazu, eine weniger komplexe Optimierungsstrategie zu wählen, um die Praktikabilität zu gewährleisten. Aus diesem Grund liegt auch hier die Betrachtung des Greedy-Ansatzes nahe. Dieser lässt sich leicht auf die vorliegende Arbeit übertragen, indem für jeden Knoten jeweils nur die Nachbarknoten Einfluss auf die Energieminimierung haben. Jede Teilkomponente der Energiefunktion wird

bezüglich ihrer Nachbarumgebung normiert und bewertet. Auf die allgemeinen Möglichkeiten der Normierung für die einzelnen Energien wurde bereits in 4.5 eingegangen. Darunter waren im Gegensatz zum Greedy-Ansatz auch globale Normierungen, die als geeignet angesehen werden. Das ist darin begründet, dass hier durch die Bewegungsbeschränkung kombiniert mit der Überwachung möglicher Überkreuzungen nur noch geringes Potential zur Schrumpfung, also zur Degenerierung, besteht. Lassen sich für das gesamte Netz oder auch nur teilweise globale Normierungsgrößen verwenden, bedeutet dies eine wichtige Einsparung der Rechenzeit bei einer Komplexität von  $O(nm)$ , wobei  $m$  hier die Größe der Nachbarschaft darstellt. Schwierig ist hier aber die Betrachtung der krümmungsbasierten Energie, da für ihre Berechnung jeweils wiederum die Nachbarumgebung berücksichtigt wird. Wird eine relative Normierung anhand der Nachbarschaften durchgeführt, welche iterativ neu berechnet werden muss, erhält man  $O(nm^2)$ . Um das zu vermeiden, muss einmalig eine punkt- oder bereichsweise Abschätzung der Extrema der Krümmungsenergien auf Basis der Grauwertprofilausmaße und Richtung erfolgen.

### 4.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Verfahren zur aufgabenangepassten und kontrollierten Oberflächenerzeugung aus Computertomographiedaten vollständig entworfen und seine Umsetzbarkeit in den Einzelschritten dargelegt. Zunächst wurde hier auf Basis der Anforderungen an ein solches Verfahren die geeignete Grundlage evaluiert und das Verfahren der Aktiven Konturen als optimale Ausgangsbasis ermittelt. Darauf aufbauend wurde ein Ablaufplan für das gesamte Verfahren entworfen. Für jeden Teilaspekt dieses Ablaufs erfolgte mit Blick auf die Praxistauglichkeit die Darlegung und Bewertung verschiedener Alternativen der Anwendung. Einige Teile besitzen eindeutige Umsetzungen, während an anderen Stellen aufgabenabhängig unterschieden werden muss. Kurz zusammengefasst ergaben sich für die Schritte folgende wesentliche und für die Umsetzung relevante Erkenntnisse:

- Auswahl der ROI erfolgt je nach Anforderung und Gegebenheiten optimalerweise modellbasiert oder auf Basis von generierten Modellen durch automatische Krümmungsanalyse.
- Überführung der ROI in die Initialoberfläche erfolgt entsprechend als Triangulation der Modelle oder Segmentierung der Punktwolken.
- Übergeordnetes Vorwissen wird hier stets als Grauwert- oder als Krümmungsinformation formuliert und fließt in die Energiefunktionen ein.

- Energiefunktionen werden grauwertbasiert und krümmungsbasiert separat aufgestellt und normiert und schließlich als Gesamtenergie zusammengefasst und bewertet.
- Suchbereiche für die Positionsvariation werden hier als eindimensionale Grauwertprofile gewählt entlang der Normalenrichtung, mit Ausnahme der Ecken und Kanten.
- Die Grauwerte werden für die Aufstellung der Profile interpoliert.
- Zur exakten Durchführung der Positionsvariationen werden die Durchdringungslängen bestimmt und gespeichert.
- Eine subvoxelgenaue Suche kann durch Unterteilung der Profillängen und passende Interpolation der Grauwerte realisiert werden.
- Für die Minimumssuche bzw. Optimierung ist ein Greedy-Algorithmus nutzbar.

Darüber hinaus wurden einige notwendige und mögliche Nutzerinteraktionen identifiziert und festgelegt. Diese garantieren die Kontrolle des Anwenders über die Netzerzeugung und ermöglichen eine direkte Einflussnahme. Insgesamt sollte für eine Vielzahl der Eingaben jedoch idealerweise eine automatische Bestimmung zur Verfügung stehen. Um aus den einzelnen Teilen einen Gesamttablauf zu definieren, bedarf es eines Implementierungsplans, der alle Varianten in Abhängigkeit der Aufgaben und Nutzereingaben beinhaltet. Um dies zu realisieren sind alle Arbeitspakete erneut im Zusammenhang zu betrachten und die vollständige Umsetzungskette für alle denkbaren Anwendungsszenarien aufzustellen, um schließlich die optimale Oberflächenerzeugung auf Basis der hier ermittelten Varianten und Alternativabläufe zu erhalten.



---

# 5. Umsetzung einer aufgabenangepassten Oberflächengenerierung

Nachdem die Möglichkeiten und Varianten eines nutzerorientierten Verfahrens zur aufgabenangepassten Erzeugung von Oberflächen ausführlich diskutiert wurden, gilt es im nächsten Schritt, deren Praxistauglichkeit zu beweisen. Dazu wird in diesem Kapitel die prototypische Umsetzung vorgestellt, wobei der Fokus auf den verfahrenstechnischen Besonderheiten liegt. Darüber hinaus werden die zu berücksichtigenden Schwierigkeiten für einzelne Schritte des Vorgehens sowie für den Gesamtprozess beleuchtet.

## 5.1 Gesamtprozess

Die Umsetzung des vorgestellten Verfahrens wird anhand der ermittelten Teilkomponenten realisiert, unterliegt jedoch einigen Anforderungen und Bedingungen. Hierbei gilt es, die vorhandenen Varianten und Möglichkeiten nach den Abwägungen aus Kapitel 4 auszuwählen und entsprechend zu kombinieren. Ebenso sind die Aufgaben und die mögliche Nutzerinteraktion festzulegen, die im Rahmen dieser Implementierung durchgeführt werden können oder müssen.

### 5.1.1 Rahmenbedingungen

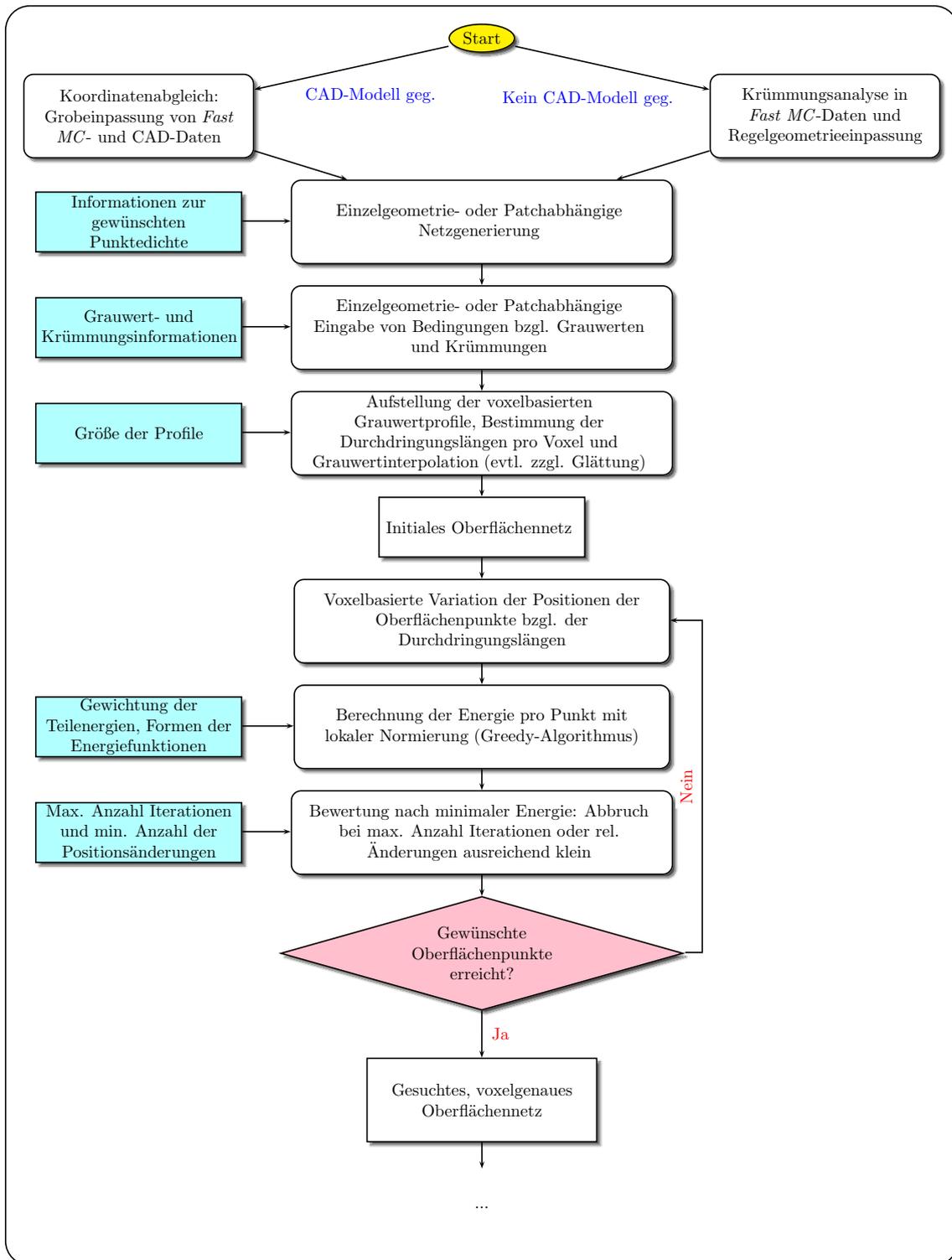
Für die softwaretechnische Umsetzung des Verfahrens werden verschiedene Anforderungen an die Entwicklungsumgebung gestellt und geeignete Instrumente benötigt. Es sollen sowohl CAD-Modelle, als auch Oberflächennetze und Voxeldaten verarbeitet und visualisiert werden können. Darüber hinaus ist Nutzerinteraktion unterschiedlicher Art notwendig. Um eine einzige, möglichst umfassende Anwendung zu

gewährleisten, wird für die Umsetzung die Software WinWerth<sup>®</sup>[Werc] der Werth Messtechnik GmbH herangezogen. Diese beinhaltet unter anderem ein Modul zur dreidimensionalen Verarbeitung von CAD- und Oberflächendaten, welches zusätzlich zu den hier geforderten Schnittstellen über die Möglichkeit der Koordinatentransformation verfügt sowie messtechnische Auswertungen erlaubt. Die Methoden zur Behandlung von CAD-Modellen basieren auf der offenen Softwarebibliothek OpenCascade [Opea], welche die Verwendung und Anpassung der entsprechenden Algorithmen ermöglicht. Schließlich lässt die Modularität der Rahmensoftware die Kombination mit weiteren Komponenten zu. So wurde eine am Fraunhofer IPA entstandene Entwicklung zur schichtweisen Darstellung und Verarbeitung von Voxeldaten in WinWerth<sup>®</sup>integriert und an das 3D-Modul angebunden. Zusätzlich kommen zur Generierung und Visualisierung der Ergebnisse an einigen Stellen weitere Entwicklungen des Fraunhofer IPA sowie die Oberflächenerzeugung und Inspektion des Softwareprodukts AstraCAD der Firma Pagoda Systems Software Solutions zum Einsatz [Pag].

Mit der Integration aller notwendigen Komponenten in eine einzige Softwareumgebung ist der erste Schritt zur nutzerfreundlichen Anwendung getan. Eine weitere Anforderung besteht in der Minimierung der notwendigen Eingaben. Um dies zu gewährleisten, wird für jede Teilkomponente analysiert, inwiefern eine Abschätzung für plausible Standardwerte oder eine automatisierte Bestimmung möglich ist. Zudem werden die Abläufe entsprechend der definierten Umsetzung auf die für typische CT-Aufgaben relevanten Anwendungen eingeschränkt. Auf diese Weise kann eine ausführliche Prüfung auf Eignung des Verfahrens durchgeführt werden, wobei die Erweiterbarkeit stets garantiert ist.

### 5.1.2 Ablaufdefinition

In Anlehnung an den Verfahrensentwurf bei 4.1 und auf Basis der Erkenntnisse bezüglich der Teilkomponenten wurde für die Implementierung der Gesamtablauf in Abbildung 5.1 festgelegt. Das Diagramm beschreibt das Vorgehen im Detail. Die Initialisierung wird in Abhängigkeit der Gegebenheit einer Konstruktion in Form eines CAD-Modell durchgeführt. In beiden Fällen ist vom *Fast MC* die Rede. Damit ist die Erzeugung einer sehr groben Punktwolke auf Basis eines globalen Schwellwerts gemeint, analog zum Vorgehen des Marching Cubes Algorithmus. Jedoch wird hierbei auf die Fallunterscheidung und damit auf die Triangulierung verzichtet und außerdem nicht jede Schicht untersucht. Als Ergebnis erhält man eine Punktwolke, die sowohl für eine Koordinatentransformation zur Übertragung in ein gemeinsames Koordinatensystem als auch für eine Krümmungsanalyse ausreichend ist. Zu erwähnen ist, dass für die Krümmungsanalyse eine höhere Punktedichte zu bevorzugen ist, während die Koordinatentransformation mit tendenziell wenigen Punkten



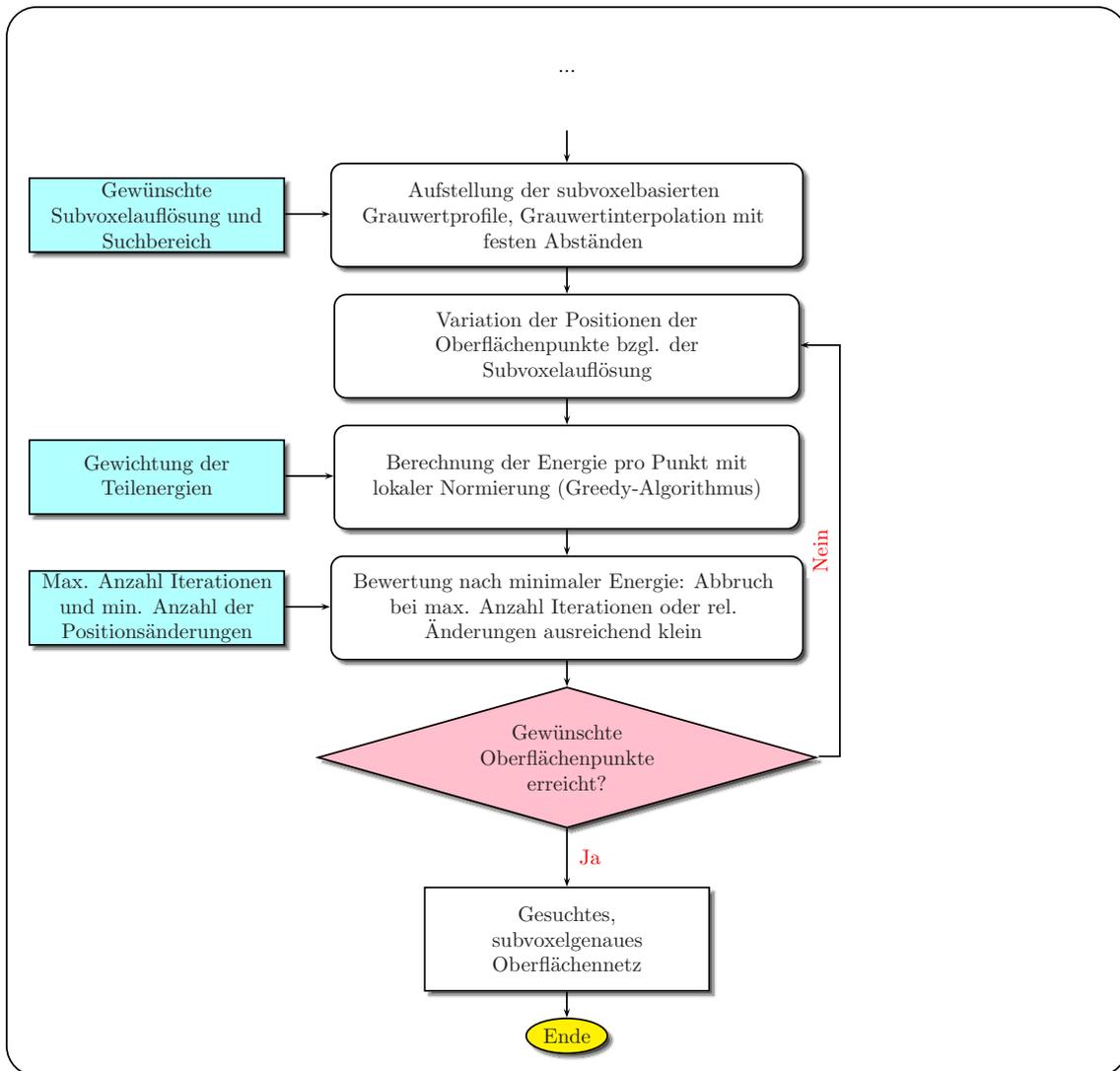


Abbildung 5.1: Detailliertes Ablaufdiagramm der Implementierung zur aufgabenbasierten Oberflächenextraktion

auskommt. Ausgehend von den resultierenden Modellen können alle weiteren Schritte für die Einzelgeometrien bzw. Patches gleichermaßen durchgeführt werden. Am auffälligsten ist bei dem dargestellten Ablauf das doppelte Vorkommen der Entscheidung und Oberflächenvariation. Dies rührt daher, dass die Bestimmung der Oberflächenpunkte in zwei Schritten durchgeführt wird. Zunächst erfolgt die voxelgenaue Bestimmung der Position, die die Startumgebung für die Suche im Subvoxelbereich im zweiten Schritt definiert. Das zweistufige Vorgehen hat den Vorteil, dass eine separate Parametrierung möglich ist. Die Notwendigkeit dazu besteht aufgrund der unterschiedlichen Strukturen. So kann beispielsweise ein kleinerer Suchbereich im zweiten Durchlauf gewählt werden, weiteres hierzu siehe 5.5.

Auf der linken Seite sind die notwendigen Eingabewerte für die jeweiligen Komponenten aufgelistet. Die vollständige Aufzählung und Erläuterung aller Parameter ist in Anhang A zu finden. Da es sich um eine zu große Anzahl handelt, ist eine rein

manuelle Eingabe vor dem Start nicht sehr praktikabel. Der Umgang mit den verschiedenen Parametern sowie die Details für die Auswahl der einzelnen Schritte wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 5.1.3 Aufgabenabläufe

Neben dem Ablauf des Verfahrens müssen ebenso die möglichen Aufgaben definiert werden. Darunter ist zu verstehen, dass die für die praktische Anwendung relevanten Problemstellungen identifiziert und ihre Zusammenhänge mit den Nutzereingaben und Interaktionen festgelegt werden. Es wird folglich definiert, welche Anforderungen an die Oberfläche in der prototypischen Umsetzung gestellt werden können. In der folgenden Auflistung ist schrittweise erläutert, wie sich der Ablauf für den Nutzer von außen betrachtet verhält:

- a) **Manuelle, modellbasierte Bereichsfestlegung:** Als Ausgangsbasis dient stets ein nach Nutzerangaben trianguliertes Oberflächennetz, das den Suchbereich vollständig vorgibt.
- b) **Optionale Auswahl der Grauwertinformation:**
  - größter Gradient  $\Rightarrow E_{Grad}$ ,
  - bestimmtes Material relativ zum Bereich  $\Rightarrow E_{Mat(side)}$ ,
  - bestimmter Materialübergang nach Nutzerangabe  $\Rightarrow E_{Thresh}$ .
- c) **Optionale Auswahl der Krümmungsinformationen:**
  - möglichst flach  $\Rightarrow E_{Flach}$ ,
  - Angabe einer Sollgeometrie  $\Rightarrow E_{KWnom}$ ,
  - Auswahl zwischen folgenden Bedingungen: möglichst zylindrisch oder möglichst kugelförmig  $\Rightarrow E_{KWrel}$  mit  $K = 0$  und  $H \neq 0, Hconst$  oder  $H = K^2$ : Beides erfolgt in Kombination mit einem Minimierungsgebot.
- d) **Kombination für die Energiefunktion:** Gewichtung der beiden Komponenten entsprechend Relevanz für die Aufgabe.

## 5.2 Bereichsabhängige Initialisierung

### 5.2.1 Modellbestimmung und Auswahl

Wie bereits im Ablaufdiagramm 5.1 deutlich wurde, wird unabhängig von der Existenz einer 3D-Konstruktion eine modellbasierte Auswahl durchgeführt. Ist ein CAD-Modell gegeben, ist die Auswahl trivial durch manuelles Markieren eines oder mehrerer Patches möglich. Sie können durch gleichzeitige Auswahl gruppiert werden,

sodass sie in den nachfolgenden Schritten als eine ROI behandelt werden. Ein Bereich wird nach Markierung mit den gewünschten Informationen trianguliert und parametrisiert und so an die Oberflächenbestimmung übergeben. Sollen mehrere unterschiedliche Bereiche zusammengefasst werden, erfolgt dies nacheinander. Ist kein CAD-Modell gegeben, wird nach 4.3.3 eine Krümmungsanalyse in einer ungefähren Punktwolke durchgeführt. Hier ist zu beachten, dass der interessante Bereich in der Vorabpunktwolke abgebildet ist. Dazu kann eine Schwellwertanpassung notwendig sein, sollte der relevante Materialübergang nicht dem automatisch bestimmten Übergang entsprechen. Dies bedarf etwas Erfahrung des Nutzers im Umgang mit CT-Daten und Schwellwertverfahren. Das Ergebnis der Krümmungsanalyse sind Geometriemodelle, die sich leicht in ein CAD-Modell überführen lassen. In dieser Umsetzung erfolgt die Krümmungsanalyse mit der IPA-eigenen Software Progugs. In Abbildung 5.2 ist das Vorgehen für das bereits bekannte Beispiel des Multimaterial-Zylinders, bei welchem lediglich die Berührungsfläche von Interesse ist, aufgezeigt. Ausgehend vom Volumenmodell muss der Schwellwert bei 70 Prozent bezüglich der

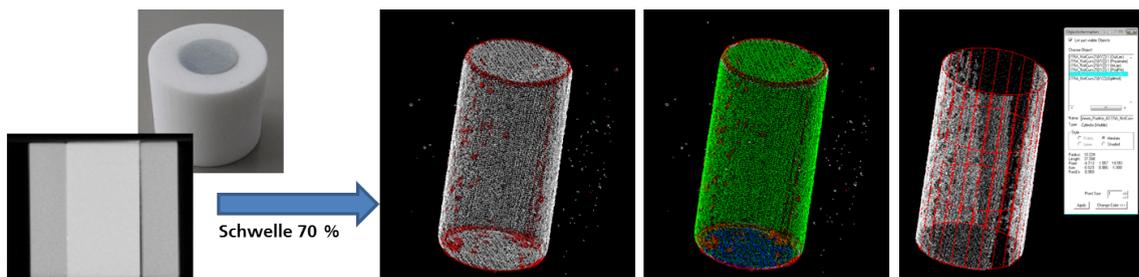


Abbildung 5.2: Überführung von Punktwolken in Geometriemodell mittels Krümmungsanalyse am Beispiel eines Zylinders

Grauwertspanne gewählt werden. Die daraus resultierende Punktwolke ist zwar nicht korrekt, aber ausreichend genau für die Initialisierung. Zunächst werden die Punkte in Bereiche kleiner und großer Krümmung (rot) geteilt. Innerhalb der Regionen mit kleiner Krümmung werden im Anschluss Bereiche gleicher bzw. ähnlicher Krümmung zusammengefasst und eingefärbt. Diese dienen als Grundlage für das automatische Einpassen von Regelgeometrien. Im Beispiel konnte direkt der gesuchte Zylinder bestimmt werden. Als Ergebnis erhält man den Radius, die Hauptachse, den Ursprung und die Höhe des Zylinders. Mit diesen Eingabewerten lassen sich direkt in WinWerth<sup>®</sup> oder anderen CAD-fähigen Programmen die benötigten Geometrielemente konstruieren. Die Genauigkeit spielt an dieser Stelle eine untergeordnete Rolle, da die Initialisierung lediglich in der Nähe der gesuchten Oberfläche liegen muss.

## 5.2.2 Eingabeparameter und Triangulation

Für die Überführung der Modelle in Dreiecksnetze werden bestehende, bereits in WinWerth<sup>®</sup> integrierte Schnittstellen und Verfahren genutzt, die durch gleichmäßige Unterteilung auf einfache Weise schnell beliebig feine Netze erzeugen. Als Grundlage dienen folgende Eingabeparameter, über welche sich die Struktur und Punktdichte manuell steuern lässt.

- Maximale Kantenlänge
- Maximale Abweichung der Kanten zur CAD-Oberfläche
- Minimale Anzahl an Punkten

Die Unterteilung erfolgt stets unter der Annahme, dass alle drei Bedingungen erfüllt sein müssen. Prinzipiell ist die Steuerung eines dieser Parameter für eine geeignete Dichteveriation vollkommen ausreichend. In Abbildung 5.3 sind beispielsweise die Ergebnisse für verschiedene Maxima der Kantenlängen anhand des Modells einer Kugel zu sehen. Die Ergebnisnetze dieser Form der Triangulation nehmen keine Rücksicht

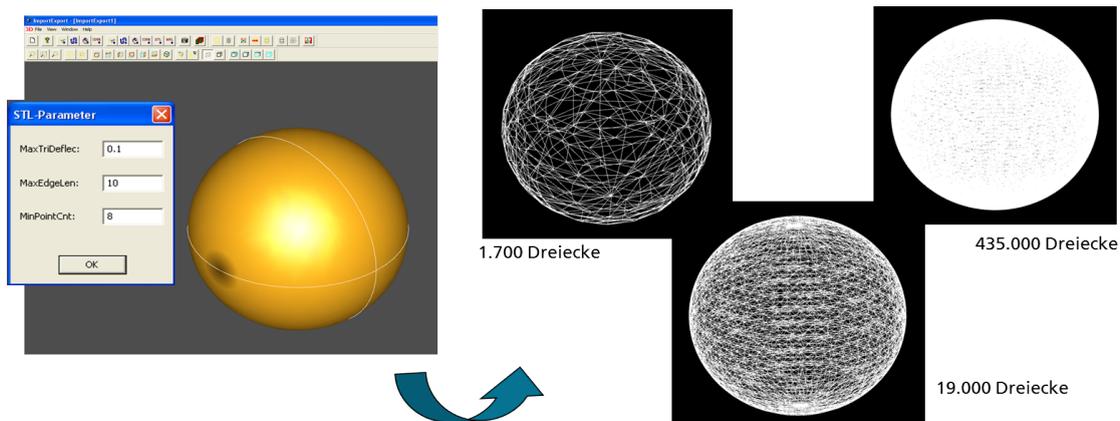


Abbildung 5.3: Triangulation des CAD-Modells einer Kugel mit unterschiedlichen Parametern

auf Form und Regularität der Dreiecke. Es entstehen, ähnlich wie beim Marching Cubes Algorithmus, häufig stumpfe und gelegentlich degenerierte Dreiecke. Da das Verfahren ohne jegliche Überarbeitung oder Optimierung des Dreiecksstrukturen im Netz auskommen soll, müssen diese eliminiert oder bei späteren Berechnungen bedacht werden, da derartige Irregularitäten häufig zu numerischen Instabilitäten führen. Dies spielt vor allem bei der Krümmungsberechnung eine wichtige Rolle.

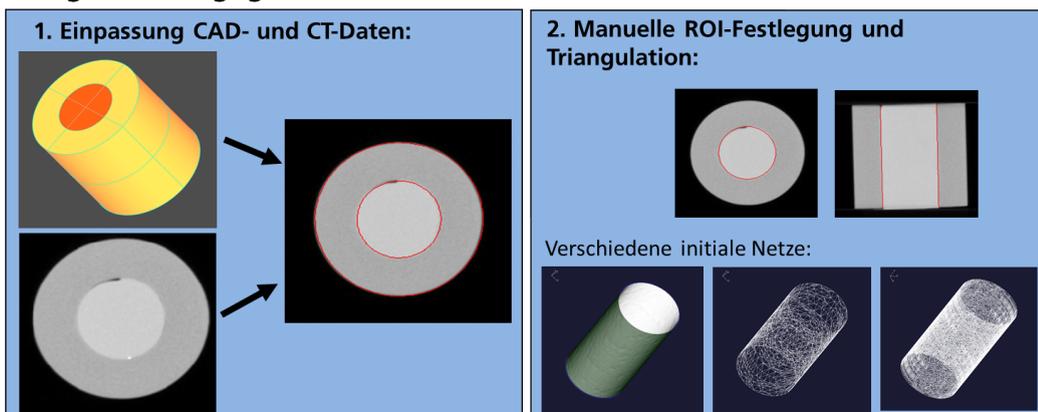
Die entstandenen Netze sind bereits eine gute Initialisierung und benötigen lediglich wenige Schritte, um optimal für die folgende Auswertung vorbereitet zu sein. Um die Berechnung aller lokalen Nachbarschaftsbedingungen zu beschleunigen, werden diese

für jeden Punkt vorab bestimmt und im Umlaufsinn sortiert. Darüber hinaus wird mit Hilfe der Einführung eines zusätzlichen minimalen Punktabstands dafür gesorgt, dass keine derart kurzen Kanten vorkommen, welche bereits zu Degeneration durch diskrete Berechnungen führen. Dazu werden nahe Punkte zu einem zusammengefasst. Zuletzt ist die Identifikation und Markierung der Randpunkte notwendig, da diese im späteren Verlauf gesondert behandelt werden müssen.

### 5.2.3 Zusammenfassung der Bereichsauswahl

Um das Vorgehen der Bereichsauswahl und Verfahrensinitialisierung in der Umsetzung zusammenzufassen, sind in Abbildung 5.4 beide Wege zur Bestimmung der Initialoberfläche vollständig anhand des bekannten Beispiels gegenübergestellt. Die Überlagerung des Volumenmodells und der Oberfläche ist im Schichtbild durch einen Konturschnitt (rote Kontur) dargestellt.

#### Vorgehen bei gegebenem CAD-Modell



#### Vorgehen ohne CAD-Modell

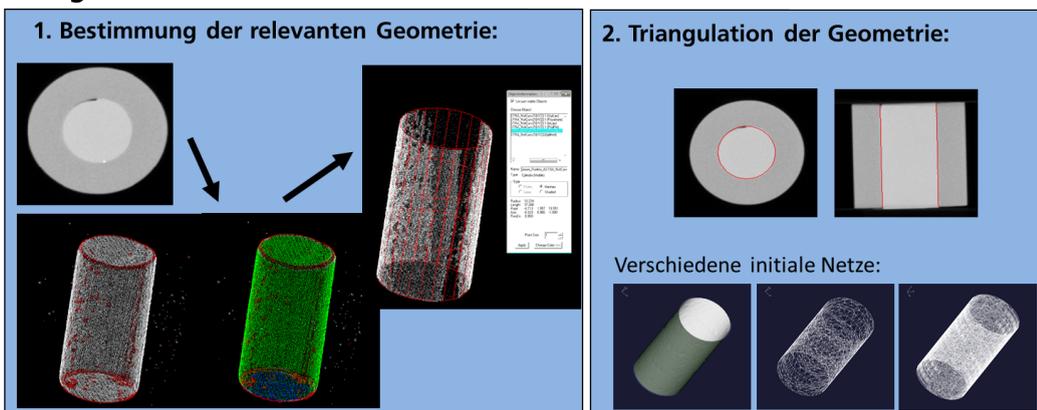


Abbildung 5.4: Vorgehen der Initialisierung mit und ohne gegebenem CAD-Modell

## 5.3 Grauwertprofilauflistung und -analyse

Auf Basis des initialen Dreiecksnetzes können punktweise die Grauwertprofile aufgestellt werden. Dies erfolgt für jeden Punkt entlang der Normalenrichtung und wird wie in 4.6 beschrieben über die Schnittberechnung mit dem Voxelgitter bestimmt. Die Schnittpunkte führen zum einen zu den interpolierten Grauwerten und können zum anderen für die Berechnung der Durchdringungslängen pro Voxelbereich genutzt werden.

Um sowohl der Flexibilität der Snakes für die Positionsvariation gerecht zu werden als auch den Aufwand einer iterativen Neuberechnung der Grauwertprofile zu vermeiden, wurde ein Kompromiss geschlossen. Hiernach wird ein großes Profil festgelegt, jedoch pro Iterationsschritt nur in einem Teilbereich variiert. Dies verhindert ein falsches „Abwandern“ bei guter Initialisierung und ermöglicht gleichzeitig das Auffinden entfernter Minima bei schlechter initialer Position.

Die Profilgröße wird mit einem Erfahrungswert von maximal  $\pm 10\%$  der Voxel der Dimension entlang der Drehachse des CT-Systems vom Ausgangsvoxel abgeschätzt, da in dieser Dimension die Aufnahme üblicherweise in Abhängigkeit der Bauteilgröße beschnitten wird. Zusätzlich muss im Fall des Vorkommens geringerer Wandstärken dies Berücksichtigung finden. Die grobe und schnelle Bestimmung der ungefähren Wandstärken zur Abschätzung des maximal sinnvollen Grauwertprofils sollte jedoch nur bei Bedarf durchgeführt werden. Die Notwendigkeit kann beispielsweise vorab durch Analyse des CAD-Modells oder aufgrund des Wissens des Nutzers festgestellt werden. In diesem Fall dient die halbe Wandstärke als lokale Beschränkung der Profilgröße. Für den Teilbereich wird schließlich das halbe Profil genutzt.

Nach Aufstellung der Grauwertprofile erfolgt die Einteilung in einzelne Bereiche, analog zu den definierten Übergängen in Tabelle 4.2, und die Bestimmung der mittleren Bereichswerte und -größen. Dies dient als Vorarbeit für die grauwertbasierte Energieberechnung. Auch an dieser Stelle ist eine Plausibilitätsprüfung sinnvoll, die im Fall einer starken Abweichung von den erwarteten Formen einen deutlichen Hinweis auf eine ungeeignete Profilgröße liefert. Weist das Profil beispielweise insgesamt eine zu geringe Grauwertspanne auf, muss der Bereich vergrößert werden. Liegt eine Vielzahl deutlicher Materialübergänge mit Vorzeichenwechsel vor, erscheint eine Verkleinerung bzw. eine punktuelle Wandstärkenbestimmung notwendig.

Die Grauwertprofile der Randpunkte benötigen eine alternative Richtung. Sinnvollerweise wird dieser Vektor als Mittel der Nachbarnormalen (keine Randpunkte) bestimmt. Darüber hinaus muss auch hier das resultierende Profil auf einen plausiblen Verlauf hin überprüft werden. Ist keine geeignete Positionsvariation auf Basis der Grauwerte möglich, wird der Randpunkt als fest angenommen und nach Abschluss der Energieminimierung an die Nachbarpositionen krümmungsbedingt angepasst.

## 5.4 Umsetzung der Energiefunktionen

Die Aufstellung der Energiefunktionen stellt das Herzstück des Verfahrens dar. Ihr korrekter Einsatz stellt sicher, dass die gesuchten Positionen der Oberflächenpunkte gefunden werden können. Aus diesem Grund müssen sowohl die richtige Verwendung der verschiedenen Energieformen als auch die Einhaltung aller Anforderungen bei der Umsetzung gewährleistet sein.

### 5.4.1 Nutzereingaben

Wie auch bei den vorangegangenen Schritten besteht hier das Anliegen, die Notwendigkeit von Nutzerinteraktion gering zu halten, jedoch gewünschte Eingriffe zu erlauben. Ziel ist es also, Standardwerte für die Eingaben zu definieren oder zu bestimmen. Vor allem bezüglich der Energiefunktionen sollen Strategien zur sinnvollen Verwendung bereitgestellt werden, da hier einige Erfahrung durch den Nutzer notwendig ist. Grundsätzlich sind jedoch alle Parameter manuell anpass- und austauschbar.

Für die Wahl der Form von  $E_{Vox}$  kann die Analyse des jeweiligen Grauwertprofils als Grundlage dienen. Besteht ein starker Kontrast und Übergang, sind die Suche nach dem größten Gradienten oder die Nutzung eines Schwellwerts die einfachsten Wege zur optimalen Grenze. Ein schwacher Grauwertunterschied oder ein weicher, linearer Übergang muss hingegen im Zusammenhang mit seinen ermittelten Bereichen ausgewertet werden. Das bedeutet, es bedarf der Angabe einer Seite des Profils ausgehend von der initialen Position. Da bei den ursprünglichen Modellen häufig das Patch oder die Geometrie die Normalenrichtung bereits außen und innen auf die gewünschte Weise repräsentieren, wird diese als Standardrichtung festgelegt. Soll ein fester Schwellwert genutzt werden, kann eine automatisierte Berechnung auf Basis aller betroffenen Grauwertprofile erfolgen und durch einfache Mittelwertbildung stattfinden.

Ebenso besteht für die Berücksichtigung der Krümmung bei  $E_{Curv}$  die Forderung nach automatisierter Initialisierung. Da bei einem guten Ausgangsmodell bereits eine ähnliche Geometrie zur Verfügung steht wie im realen Objekt, lassen sich Sollwerte für die Krümmungsparameter direkt hieraus festlegen. Dazu wird die lokale Krümmung für jeden Punkt vor der Netzvariation bestimmt und entweder individuell oder gemittelt für alle zu betrachtenden Positionen identisch festgelegt. Im Allgemeinen soll eine Oberfläche jedoch möglichst glatt sein, also die grauwertbasierte Oberflächensuche im Hinblick auf stetig differenzierbare Übergänge unterstützen. Das bedeutet, wenn die Gewichtung deutlich stärker auf die Grauwertenergie ausfällt, dann reicht die globale Minimierung der Krümmung ohne die Nutzung von

Sollwerten aus. Die Eingabe von zusätzlichen Bedingungen, wie in 5.1.3 definiert, muss manuell erfolgen.

Weitere notwendige Informationen für eine schrittweise Minimierung sind die Anzahl der Iterationsschritte sowie die Angabe der Abbruchkriterien. Ein sinnvoller Wert für die durchzuführenden Iterationen ergibt sich aus der Größe der Grauwertprofile, da diese die Bewegung bereits einschränkt. Weil als Teilprofil pro Iterationsschritt nach Definition die Hälfte des Gesamtprofils bearbeitet wird, ist eine ebenso große Anzahl an Schritten ausreichend. Das heißt die maximale Anzahl der Durchläufe soll im Folgenden die Hälfte der Gesamtprofilgröße betragen. Als weiteres Abbruchkriterium dient die relative Anzahl an Punkten, die sich während eines Durchlaufs verändert. Unterschreitet diese einen bestimmten Wert, wird die Minimierung vorzeitig beendet. Aus Erfahrung wurde ca. 1% der Gesamtpunktzahl als gut beurteilt, kann aber ebenfalls angepasst werden.

Die letzte notwendige Eingabe ist die Gewichtung der Teilfunktionen. Diese hängt stark von der Aufgabe ab und sollte daher vom Nutzer eingegeben werden. Es wird jedoch festgelegt, dass eine Gewichtung von  $u = v = 0.5$  angenommen wird, wenn keine manuelle Eingabe erfolgt.

#### 5.4.2 Funktionsweise von $E_{Vox}$

Die grauwertbasierten Informationen werden wie zuvor beschrieben in die entsprechenden Formen der Energiefunktionen überführt und formuliert. Für jede Art der Berücksichtigung derartigen Vorwissens gilt es, die Funktionsweise darzulegen sowie deren sinnvolle Verwendung zu verdeutlichen. Zunächst soll die grundsätzliche Funktion der Grauwertenergie demonstriert werden. Dazu wurde aus einem Teilpatch des äußeren Zylinders des Beispielbauteils die Initialoberfläche definiert und deren Positionen zusätzlich mit Zufallswerten entlang der Normalenrichtung variiert, um eine nicht optimale Initialisierung zu simulieren. In Abbildung 5.5 sind beide Ergebnisse dargestellt. Hier wurde ausschließlich nach dem größten Gradienten, also mit  $E_{Grad}$ , minimiert. Es wird deutlich, dass mit beiden Initialisierungen eine ähnliche Grenzoberfläche ermittelt wird. Der wesentliche Unterschied besteht in der Wahl der Profilgröße. Denn während die nahe Oberfläche mit einem kleinen Profil von  $\pm 10$  Voxel auskommt, sind bei der größeren Abweichung  $\pm 35$  Voxel notwendig, da es sonst leicht zu Divergenz kommt. Um diesen Effekt zu verdeutlichen ist in Abbildung 5.6 ist das Ergebnis der Zufallsfläche für eine Profilgröße von  $\pm 10$  Voxeln zu sehen. Durch die unterschiedlichen Profilgrößen sind die leichten Schwankungen in den Ergebnissen zu erklären. Bei der grauwertbasierten Suche nach den Grenzflächen spielt folglich die Profilgröße die Hauptrolle. Die Anzahl der Iterationen der Energieminimierung tritt bei einer geeigneten Wahl des Suchbereichs in den Hintergrund und die besten Punktpositionen werden häufig im ersten Durchlauf gefunden.

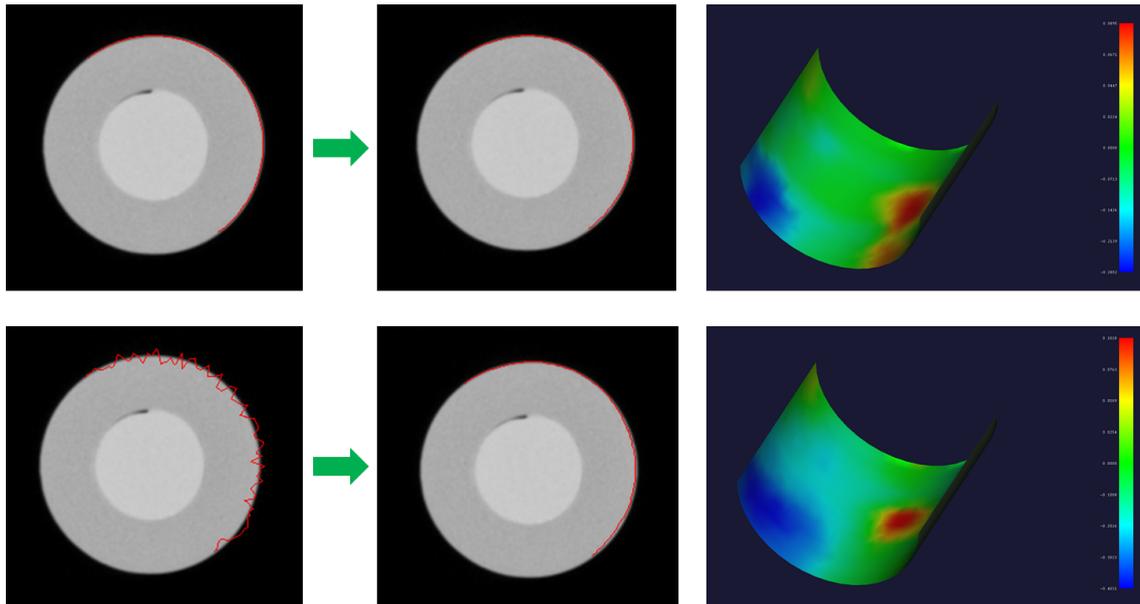


Abbildung 5.5: Energieminimierung mit  $E_{Grad}$  mit optimaler Initialisierung aus CAD-Modell (oben) und mit zufällig gestreuten Punkten (unten)

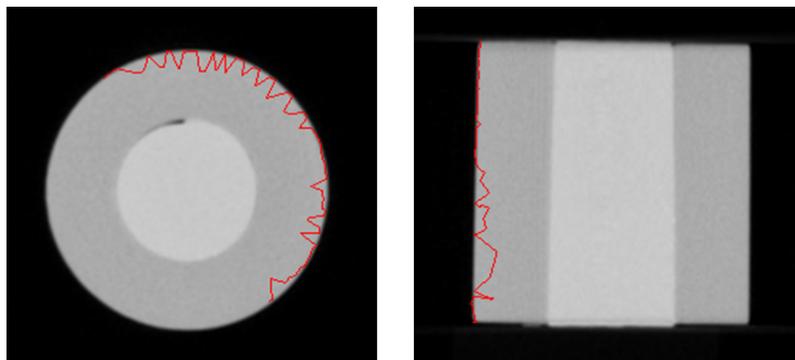


Abbildung 5.6: Ergebnis der Energieminimierung bei schlechter Initialisierung mit zu kleinem Suchbereich bzw. Profilgröße

Im bisherigen Beispiel wurde der maximale Gradient als Kriterium genutzt. Während dies für hohe Kontraste und starke Übergänge zu einem guten Ergebnis führt, eignet sich diese Form der Energie nicht für schwache Grauwertänderungen bei Materialübergängen. In Abbildung 5.7 wurde das gleiche Vorgehen sowohl für die innere als auch für die äußere Initialisierung durch das CAD-Modell verwendet. Die Grenzfläche zwischen beiden Bauteilmaterialien ist im Ergebnis offensichtlich nicht ausreichend wiedergegeben. Für diese Fälle ist die zusätzliche Angabe von Materialinformationen notwendig. Um jedoch ausreichend flexibel gegenüber CT-typischen Grauwertschwankungen oder variierenden Materialübergängen zu bleiben, werden für diese Form der Anwendung relative Werte genutzt. Bei der Suche nach Grenzen zwischen zwei Bauteilmaterialien ist es wichtig festzulegen, welches Material von Interesse ist, also die Seite des Grauwertprofils für  $E_{Mat(side)}$ . Diese kann bei Inhomogenität der Übergänge eine große Rolle spielen. In Abbildung 5.8 ist das un-

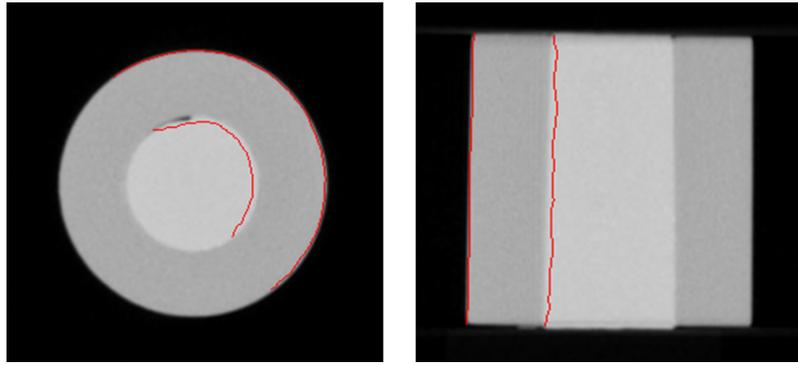


Abbildung 5.7: Ergebnis der Energieminimierung mit  $E_{Grad}$  für den inneren und den äußeren Zylinder

verschiedene Verhalten des Verfahrens je nach Wahl des Grauwertbereichs unter Nutzung von  $E_{Mat(side)}$ , wie in 4.5.2 beschrieben, dargestellt.

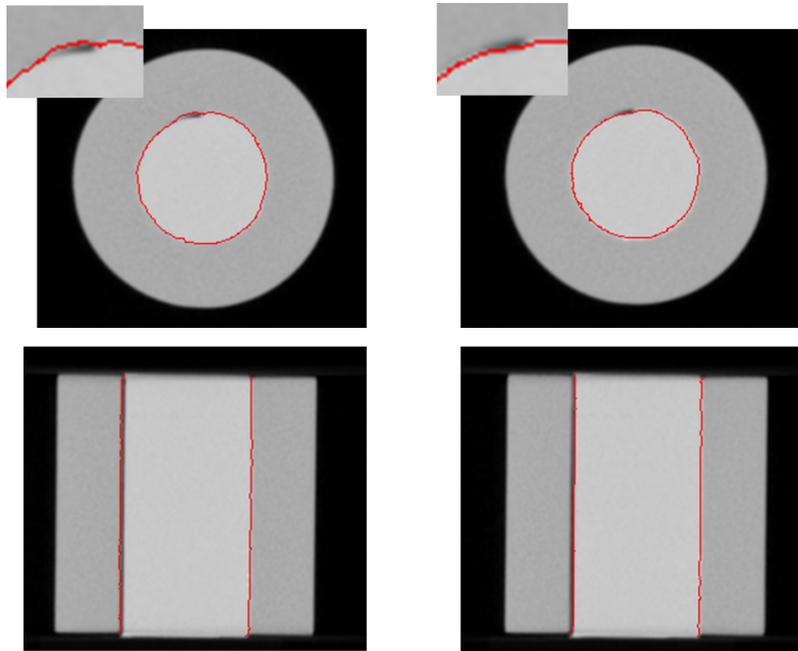


Abbildung 5.8: Ergebnisse der Minimierung der Grauwertenergie für Material rechts und links der Initialoberfläche

Vor allem im Bereich der Lücke zwischen beiden Kunststoffen wird deutlich, welche Bedeutung die Voranalyse der Profile auf Grauwertregionen für das Ergebnis hat. Auf diese Weise werden die verschiedenen Übergangsformen lokal ermittelt und die Energieminimierung für jeden Punkt separat angepasst. Das Grauwertprofil für diesen Bereich ist in 5.9 zusehen. Darin sind die beiden ermittelten Profilleiten farblich voneinander abgehoben und getrennt durch den bestimmten mittleren Index.

In Abbildung 5.10 ist derselbe Effekt für unterschiedliche Grauwerttransitionen verdeutlicht. Diese Ergebnisse zeigen eine der wesentlichsten Verbesserungen gegenüber

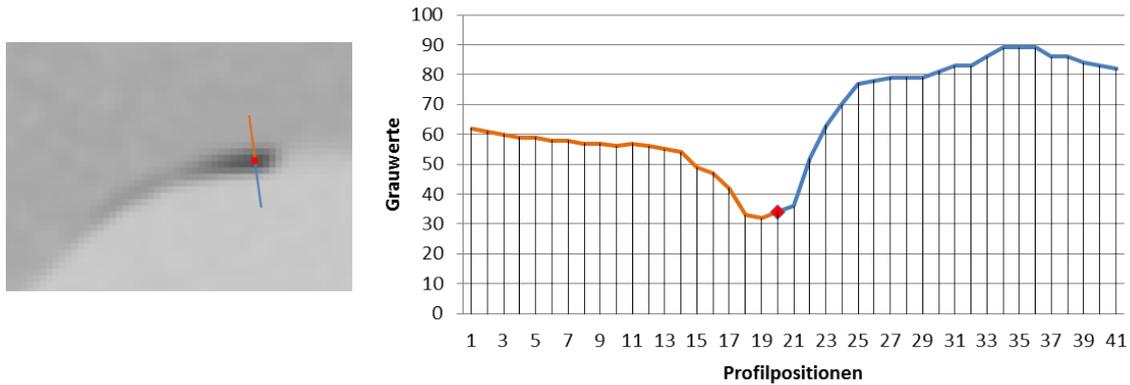


Abbildung 5.9: Grauwertprofil im Lückenbereich mit Darstellung der beiden Seiten getrennt durch die ermittelte Grenze in rot

dem Standardvorgehen des Marching Cubes Algorithmus, vergleiche hierzu Abbildung 3.10.

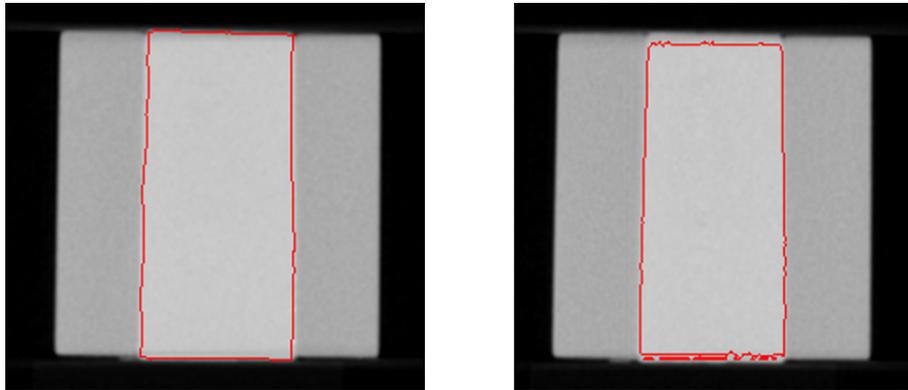


Abbildung 5.10: Vergleich des Ergebnisses der Energieminimierung für den inneren Zylinder (links) und des Marching Cubes Algorithmus mit Schwellwert bei 73% (rechts)

Die letzte Variante der Nutzung von Grauwertenergien ist in dieser Umsetzung die Wahl eines bestimmten Materialübergangs. Hierzu werden erneut die Voranalysen der Grauwertprofile herangezogen. Die Bestimmung der Extremwerte gibt die notwendige Information über die Möglichkeit der Existenz des gesuchten Übergangs und die Bereichsklassifikation erlaubt die Interpretation, ob dieser ungestört, also ohne weitere Zwischenmaterialien, vorliegt. Ist das bei einem Punkt nicht gegeben, wird in dieser Umsetzung der Punkt standardmäßig von der Variation und Bewertung ausgenommen und bleibt in seiner ursprünglichen Position. Alternativ kann er aus dem Netz entfernt werden.

Die Behandlung der Ränder bei nicht geschlossenen Netzen ist für die grauwertbasierte Energie trivial, da sie sich nicht von der inneren Punkte unterscheidet. Die Energiefunktion hängt lediglich bezüglich ihrer Normierung von Nachbarpunkten ab.

Da hierzu die Extrema aller Nachbarn bestimmt werden, spielt deren Anzahl oder Position keine Rolle.

Zur schnellen Bestimmung der nötigen Werte  $E_{VoxMax}$  und  $E_{VoxMin}$  für die Normierung erfolgt im Rahmen der einmaligen Profilanalyse eine Vorberechnung der Extrema für jedes einzelne Gesamtprofil. Diese werden im Laufe der Iterationen und Minimierungsschritte beibehalten und damit eine Neuberechnung umgangen.

### 5.4.3 Funktionsweise von $E_{Curv}$

Ebenso wie für die Grauwertenergien wird auch die Funktionsweise der ermittelten Krümmungsvarianten im Folgenden aufgezeigt. Im Gegensatz zu  $E_{Vox}$  spielen hier die Iterationsschritte durchaus eine Rolle. Um das prinzipielle Verhalten der Energieminimierung mittels Krümmungen zu verdeutlichen, wurde ein unterschiedlich stark gekrümmtes Netz erzeugt, das mit der Anforderung nach Flachheit bzw. Glattheit initialisiert wird. In Abbildung 5.11 sind Ergebnisnetze unterschiedlicher Iterationsschritte zu sehen. Dieses Beispiel zeigt die prinzipielle Funktionswei-

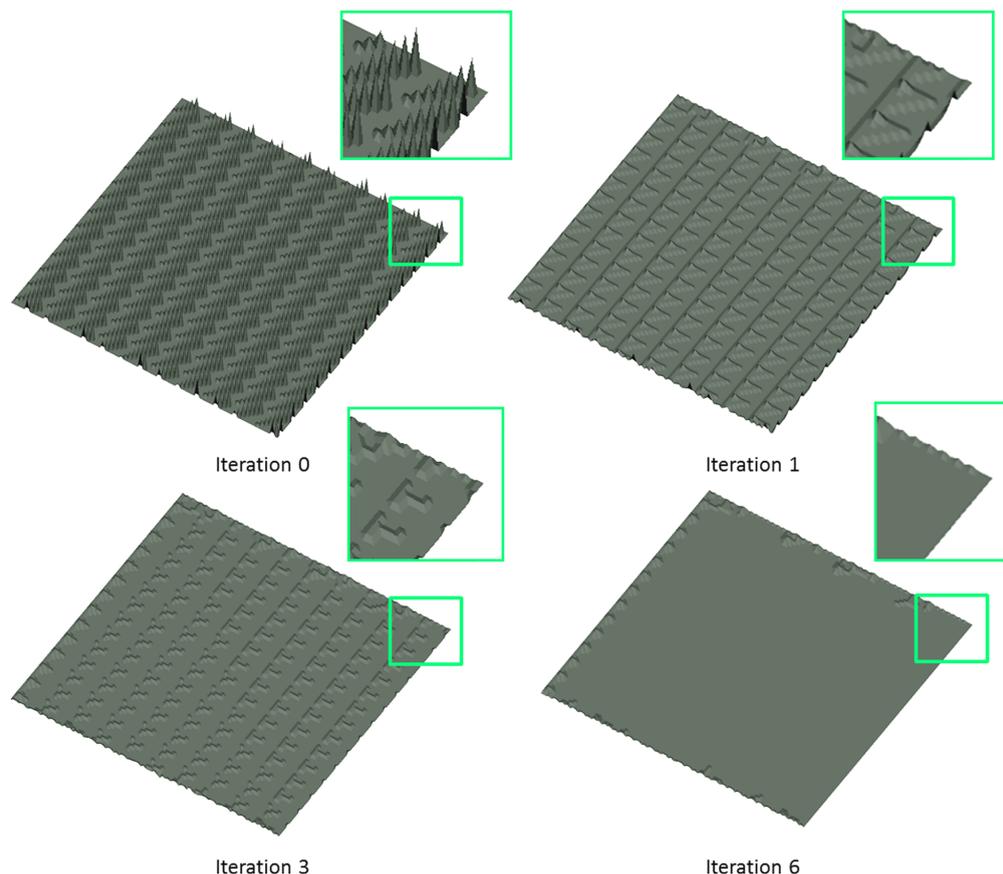


Abbildung 5.11: Ergebnisoberflächen nach Iterationsschritten mithilfe krümmungsbasierter Energieminimierung

se der Minimierung zu möglichst kleinen Krümmungen. Hier wurde als Funktion

$E_{Flach} = 0,5 \cdot (|H| + |K|)$  verwendet. In Abbildung 5.12 ist dessen Verhalten beim Beispielbauteil Zylinder für die Zufallsfläche zu sehen. Da hier keine Grauwerte berücksichtigt werden, konvergiert das Verfahren in eine möglichst glatte Oberfläche unabhängig vom Voxelmodell. Am letzten Beispiel wird deutlich, warum die

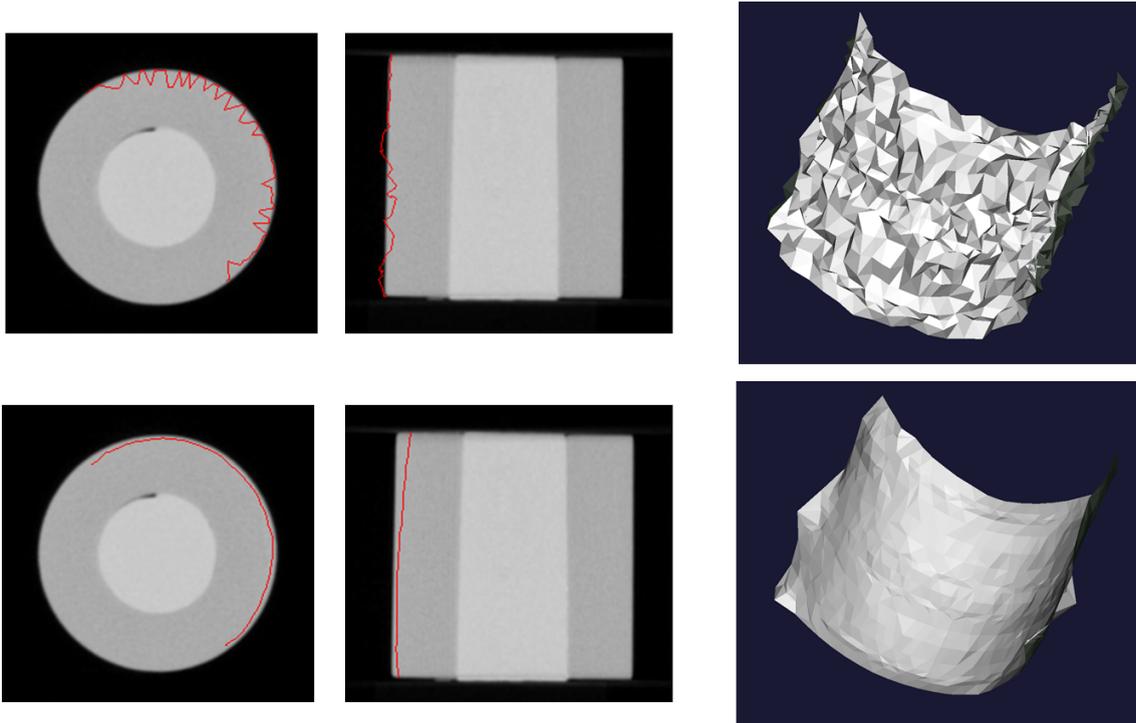


Abbildung 5.12: Initiale Zufallsfläche (oben), Ergebnis der reinen minimalen Krümmungssuche (unten)

Nutzung einer Sollform bzw. von Sollwerten oder -anforderungen sinnvoll sein kann. Dies ist vor allem bei Problemstellungen wichtig, bei welchen die Krümmung stärker gewichtet werden muss. Zu sehen ist der Unterschied zur reinen Glattheitsforderung in Abbildung 5.13. Hier wurden rechts Sollwerte für  $H$  und  $K$  angegeben, die den passenden Werten der Initialkontur entsprechen. Unter Nutzung von  $E_{KWnom}$  entfernt sich die Oberfläche auf der rechten Seite sichtbar weniger von der ursprünglich zylindrischen Form als bei reiner Krümmungsminimierung mittels  $E_{Flach}$ . Bei der Verwendung von Sollformen ist jedoch zu beachten, dass es sich hierbei um eine lokale Funktionalität handelt. Das bedeutet, jeder Punkt sucht seine Sollwerte lokal in der eigenen Nachbarschaft und das Gesamtnetz wird nicht als Ganzes berücksichtigt. Aus diesem Grund muss voraus gesetzt werden, dass die Initialisierung in seiner Geometrie der Sollform bereits bezüglich der verwendeten Sollgrößen bzw. -parameter ähnelt. Das lokale Verhalten ist in Abbildung 5.14 verdeutlicht. Zu sehen ist eine initiale Ebene, welche zylindrische Sollangaben bei der Krümmungsminimierung berücksichtigen soll. Als Ergebnis sind deutlich lokale Zylinderformen erkennbar. Jedoch ist keine Konvergenz in eine globale Zylinderform zu erwarten.

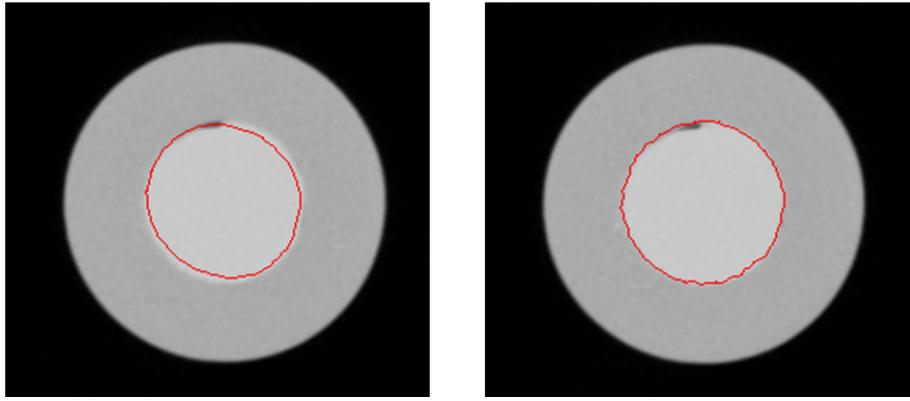


Abbildung 5.13: Energieminimierung nach  $E_{Flach}$  (links) und nach  $E_{KWnom}$  mit zylindrischen Sollwerten (rechts)

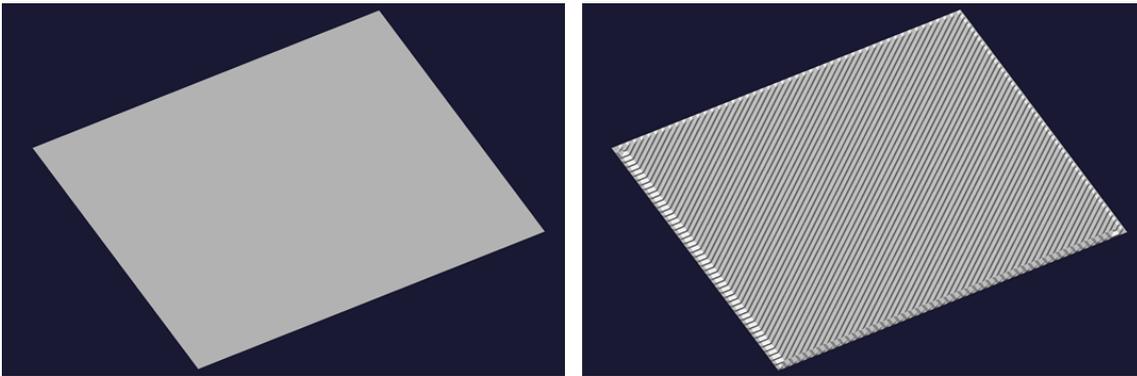


Abbildung 5.14: Verhalten bei Initialisierung durch Ebene (links) und Minimierung mit zylindrischer Sollform (rechts).

Im ersten Beispiel in 5.11 wurden die Ränder keiner gesonderten Behandlung unterzogen und es wird deutlich, dass dadurch im Gegensatz zu inneren Punkten kein optimales Verhalten vorliegt. Die Ränder nicht geschlossener Netze benötigen für die Krümmungsberechnung Anpassungen der Funktionen. Im Fall der diskreten Gaußkrümmung lässt sich unter der Annahme einer geraden Kante formulieren

$$K(p) = \Pi - \sum_{i \in \Delta(p)} \alpha_i.$$

Im Falle einer Ecke sollte

$$K(p) = \frac{\Pi}{2} - \sum_{i \in \Delta(p)} \alpha_i$$

eine ausreichende Näherung sein. Um festzustellen, ob es sich um eine Ecke oder Kante handelt, wird der Winkel zwischen beiden angrenzenden Randkanten bestimmt bzw. die Kantenlängen nach Pythagoras auf Stumpfwinkligkeit überprüft. Die mittlere Krümmung ist über die Einführung eines weiteren Faktors  $\frac{1}{2}$  für Kanten und

$\frac{1}{4}$  für Ecken abschätzbar, wobei die Gesamtberechnung für nicht geschlossene Dreiecks-umgebungen umformuliert werden muss in

$$H(p) = \frac{1}{4\text{area}(\Delta(p))} \left\| \sum_{j=0}^{j=n-1} (\cot\angle q_j * (p - q_{j+1})) + (\cot\angle q_{j+1} * (p - q_j)) \right\|.$$

Auch bei  $E_{Curv}$  wird zugunsten der Rechenzeit auf eine dynamische Normierung verzichtet. Aufgrund der eingeschränkten Profilgröße lässt sich, ausgehend von der ursprünglichen Position, die minimal und die maximal mögliche Krümmung auf Basis der Nachbarpunkte abschätzen. Hierbei wird für jede mögliche Variation des Punktes und ebenso aller seiner Nachbarn die Krümmung lokal bestimmt und damit die benötigten Normierungswerte  $E_{CurvMax}$  und  $E_{CurvMin}$  ausreichend gut ermittelt.

#### 5.4.4 Kombination der Teilenergien und Gesamtenergieminimierung

Nachdem die Funktionsweise der beiden Energieformen separat gezeigt und ihre Anwendung erläutert wurde, muss ebenso das korrekte Zusammenspiel der Energien untersucht werden. Die Kombination beider Anforderungen an die Oberfläche kann in vielfältiger Hinsicht sinnvoll sein. Gesteuert wird dies über die Gewichtung der Teilfunktionen. Beispielsweise neigen Grauwertenergien in kontrastarmen Bereichen zu Schwankungen, die durch eine Glattheitsanforderung ausgeglichen werden können. Dies ist die häufigste Form der Anwendung beider Energien in Kombination. Hier wird  $E_{Vox}$  für alle betroffenen Punkte stärker gewichtet. Grundsätzlich kann die Gewichtung individuell zugeordnet werden. Jedoch wird in dieser Umsetzung stets für einen zusammengehörigen Bereich wie bei der Triangulierung die gleiche Gewichtung angenommen. In Abbildung 5.15 ist der Einfluss der Gewichte erkennbar. Je größer die Berücksichtigung der Krümmung desto glatter die Oberfläche. Andererseits entfernt sich damit auch die Oberfläche unter Umständen von der eigentlichen Materialgrenze. Diese Gefahr besteht vorwiegend, wenn die Krümmungsbedingung nicht der Form der gesuchten Oberfläche entspricht. Ist die Forderung nach Glattheit und damit Ebenheit stark gewichtet bei einer zylindrischen Form, wie in diesem Beispiel, neigt die Oberfläche zu Abweichungen von der Materialgrenze. In der unteren Hälfte des Bildes ist anhand Soll-Ist Vergleiche mit dem Ausgangsmodell die Glättung bei Gewichtsverlagerung auf die Krümmung für das komplette Dreiecksnetz visualisiert. Die optimale Gewichtung hängt von der Aufgabenstellung und den Eingangsdaten ab.

Als Minimierungsstrategie wurde in dieser Umsetzung die Greedy-Methode nach [WS92] gewählt und diese aufgrund der Annahme einer nahen Initialisierung noch

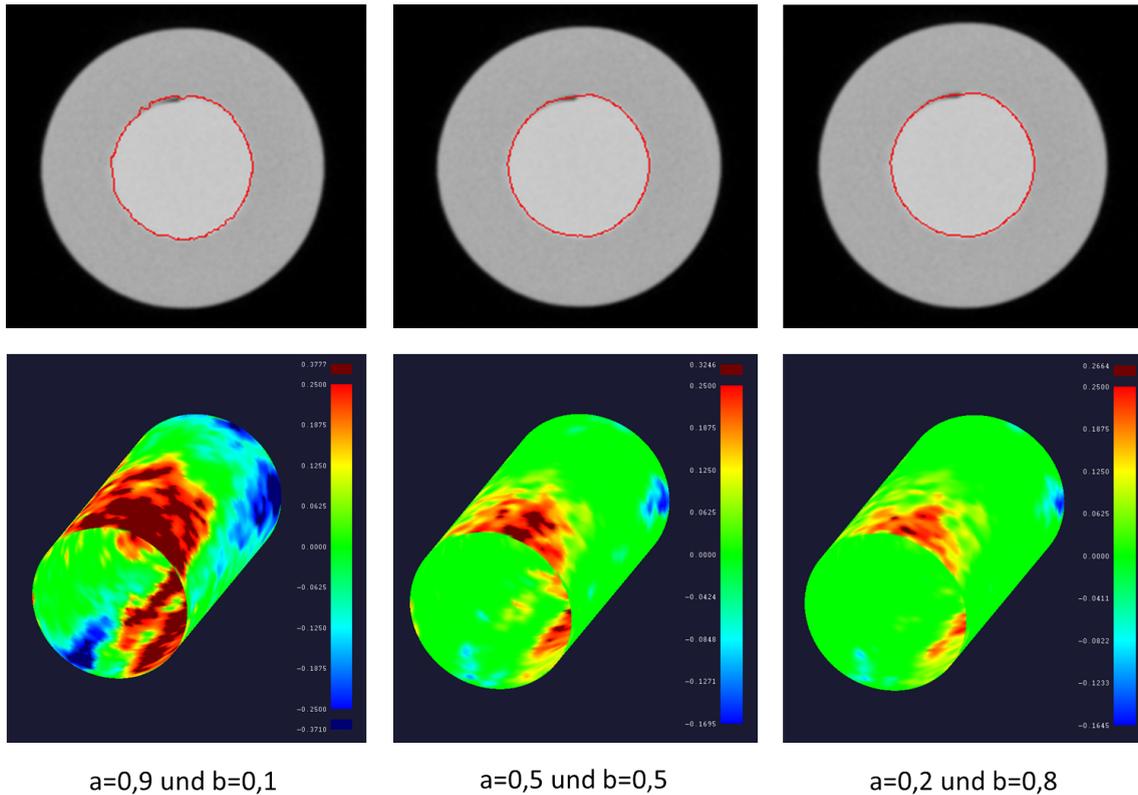


Abbildung 5.15: Beispielergebnisnetze für verschiedene Gewichtungen bei  $E = a \cdot E_{Vox} + b \cdot E_{Curv}$

weiter eingeschränkt. Diese Beschränkung bezieht sich auf die Fixierung des Suchbereichs und den Verzicht auf Neuberechnung der Grauwertprofile sowie auf die lokale Auswertung, Normierung und Bewertung der Energien.

## 5.5 Umsetzung der Subvoxelsuche

Im Ablaufplan in 5.1 ist bereits verdeutlicht, dass in dieser Umsetzung die Subvoxelunterteilung als eigenständiger Schritt behandelt wird und nach dem vollständigen Abschluss der voxelgenauen Energieminimierung erfolgt. Der grundsätzliche Ablauf unterscheidet sich nur wenig vom ersten Durchgang, da die gesamte Minimierungsstrategie und Energiebestimmung erhalten bleiben. Der Hauptunterschied besteht in der Aufstellung der Grauwertprofile, da diese äquidistant interpoliert werden. Dies geschieht hier wie in 4.7 vorgeschlagen mittels stückweise kubischer Hermite-Interpolation der Grauwerte. Die einzigen notwendigen Eingabewerte sind hier der zu interpolierende Bereich sowie die Unterteilungsgröße, sozusagen die Auflösung. Aus diesen beiden Werten wird die Profilgröße berechnet. Da es sich um eine neue Energieminimierung handelt, können jedoch auch die Gewichte und die Abbruchkriterien neu angepasst werden. Die Anzahl der Iterationen kann wie zuvor über die Profilgröße sinnvoll bestimmt werden. Die Änderung in der Gewichtung der Teilfunktionen kann durchaus relevant sein. So kann bei der Voxelsuche das größere Gewicht

auf den Grauwertinformationen liegen und anschließend bei der Subvoxelunterteilung ein höheres Gewicht für den Krümmungsanteil eine glättende Wirkung haben. Grundsätzlich ist hier eine Nutzereingabe notwendig, wobei auf die obigen Stan-

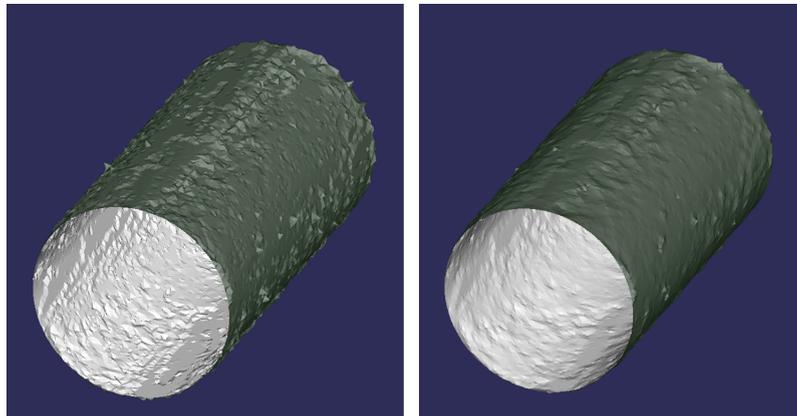


Abbildung 5.16: Gefundene Grenzfläche vor (links) und nach Subvoxelunterteilung (rechts)

dardwerte zurückgegriffen wird. Inhaltlich gibt es jedoch eine Veränderung bezüglich der unterschiedlichen Grauwertenergien. Da es sich um einen kleinen lokalen Suchbereich handelt, der durch die Voxelbestimmung bereits als grundsätzlich korrekt identifiziert wurde, ist nur noch die Bestimmung des stärksten lokalen Übergangs relevant. Auf dieser Basis wird das interpolierte Grauwertprofil erstellt und somit lediglich  $E_{Grad}$  minimiert. Ähnliches gilt für die Krümmungsenergie. Da die lokale Position bereits eventuelle Sollformen berücksichtigt hat, ist im kleinen Suchbereich eine einfache Glättungsforderung mit Hilfe von  $E_{Flach}$  ausreichend. Abbildung 5.16 zeigt die Ergebnisoberfläche vor und nach der Subvoxelunterteilung mit sichtbarer Auflösungssteigerung.

Bei der Implementierung der Subvoxelunterteilung mittels kubischer Hermite Interpolation wurden beide zuvor erwähnten Versionen der Ableitungsabschätzung realisiert. Die Einpassung von quadratischen Funktionen zur Näherung der Tangentialrichtung führt jedoch in vielen Fällen von typischen Grauwertverläufen zu Stufen- bzw. Wellenbildung. Dies hat zur Folge, dass um die Stützstellen ein abweichender Verlauf entsteht, der die Suche nach dem größten Gradienten in diesen Bereichen stark beeinflusst. Als geeignetere Näherung der Ableitungen erweist sich die Richtungswahl nach den Nachbarpunkten und wird somit für die folgende Evaluation des Verfahrens verwendet. In Abbildung 5.17 sind der ursprüngliche Grauwertverlauf sowie beide interpolierten Varianten an einem Beispiel verdeutlicht.

Für die praktische Umsetzung wird für den Fall der Nutzung eines Schwellwerts und  $E_{Thresh}$  zusätzlich eine direkte Interpolation eingeführt, ähnlich zum Vorgehen beim Marching Cubes Algorithmus. Dieses Pseudo-MC Verfahren unterteilt das Grauwertprofil im Subvoxelschritt nicht weiter, sondern interpoliert dieses linear insofern die

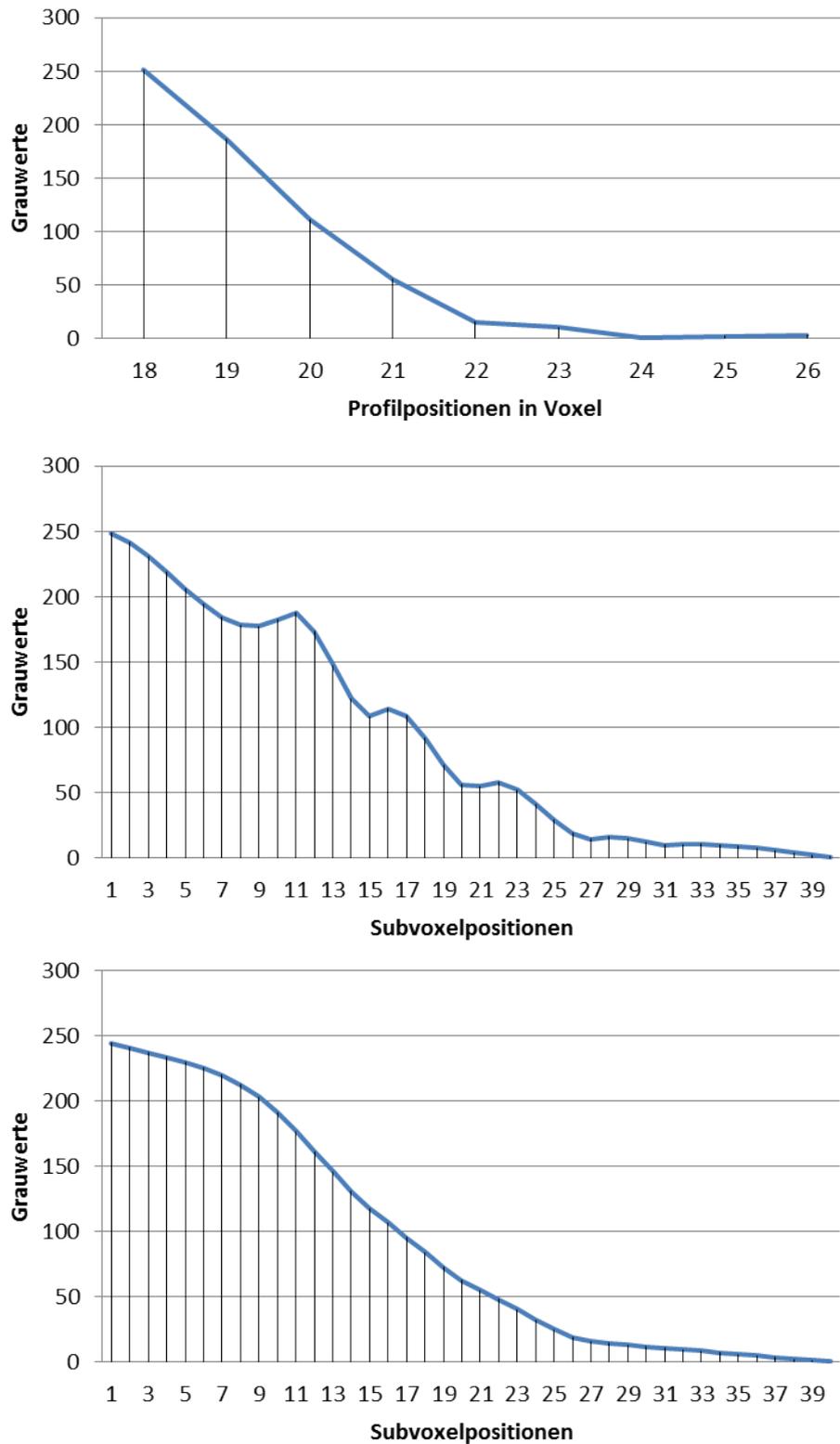


Abbildung 5.17: Unterschiedliche Ableitungsdefinition für Grauwertprofilinterpolation: Ausschnitt aus dem ursprünglichen Grauwertprofil des zu interpolierenden Bereichs (oben), die dazugehörigen Subvoxelprofile mit quadratischer Ableitungsnäherung (Mitte) und Näherung über Nachbarpunkte (unten)

Bedingung des Vorkommens des Wertes in oder zwischen zwei Voxelwerten erfüllt ist, also  $g(i) < NomGW$  und  $g(i + 1) > NomGW$ . Sollte dies nicht auf alle Punkte zutreffen, wird wie gehabt verfahren. Dank dieser Alternative werden die Vorteile des Marching Cubes Algorithmus ausgenutzt und zugleich zeitintensive Iterationen vermieden. Verwendet wird dies ausschließlich bei kontraststarken Materialübergängen zur Luft und bei gegebenem Schwellwert.

### 5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Details der Umsetzung eines aufgabenabhängigen Oberflächenextraktionsverfahrens und das abgestimmte Zusammenspiel der vielfältigen Teilkomponenten erläutert. Bei der hier vorliegenden Umsetzung wurden die dazu am besten geeigneten Varianten aller Teile identifiziert und optimal ineinander greifend realisiert. Hierbei lag ein besonderes Augenmerk auf der Benutzerfreundlichkeit und die Implementierung wurde derart konzipiert, dass der Anwender bei Bedarf und nach Wunsch auf alle relevanten Berechnungen Einfluss nehmen kann. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig. Um die optimale Durchführung des Verfahrens zu ermöglichen, erfolgte darüber hinaus die Formulierung von Anforderungen, vorwiegend die Ähnlichkeit der Initialisierung zur gesuchten Oberfläche betreffend. Außerdem wurde die prinzipielle Funktionsweise der einzelnen Energien, deren Besonderheiten sowie deren Kombination zu einer Gesamtenergie erläutert und aufgezeigt. Alle Komponenten oder Details beschriebener Bestandteile, auf die im Rahmen dieses Kapitels nicht explizit eingegangen wurde, entsprechen in ihrer Umsetzung direkt dem dazugehörigen Entwurf aus Kapitel 4 und können dort entnommen werden.

Diese beschriebene Umsetzung dient als Ausgangsbasis für die Evaluierung des Verfahrens, wobei vor allem die Qualität der Ergebnisdaten sowie dessen Anwendungsbereiche und die damit einhergehenden Abläufe im Vordergrund der Untersuchungen stehen.

---

## 6. Auswertung und Evaluation

Die aufgabenbasierte Oberflächenextraktion dient der gezielten Segmentierung relevanter Bereiche für eine bestimmte Auswertung. Wie bereits an verschiedenen Stellen erläutert, besitzt sie damit entscheidende Vorteile gegenüber dem Stand der Technik. Bezüglich der erreichbaren Messunsicherheiten sollte das hier entwickelte Verfahren dem herkömmlichen Vorgehen in nichts nachstehen. Durch die Möglichkeit der Eingabe gewünschter Sollparameter und Punktdichten ergeben sich allerdings auch weitere Einflussgrößen auf das Ergebnisnetz. Zur umfassenden Evaluation des neuen Vorgehens bedarf es folglich der Untersuchung verschiedener Aspekte. Zum ersten werden hierzu Kenngrößen zur Vergleichbarkeit mit Standardverfahren ermittelt. Zum zweiten wird das Verhalten der Ergebnisqualität in Abhängigkeit verschiedener Eingabewerte erfasst. Im letzten Schritt werden die Vorgehensweisen bei unterschiedlichen Aufgabenstellungen der Datenauswertung beispielhaft anhand realer Bauteile aufgezeigt und mit den bisher notwendigen Arbeitsschritten verglichen. Dazu werden geeignete Testkörper und -datensätze sowie entsprechende Referenzverfahren und Kenngrößen definiert und die Auswertergebnisse schließlich interpretiert und zusammengefasst.

### 6.1 Festlegungen für die Bewertung des Verfahrens

Bevor eine Versuchsdurchführung erfolgen kann, müssen alle Rahmenbedingungen, wie die genutzte Hardware, Testkörper und Referenzen, festgelegt werden. Bei dem vorliegenden Verfahren werden zusätzlich zur reinen Genauigkeitsbestimmung auch Szenarien definiert, die entweder aus realen oder realitätsnahen Aufgabenstellungen stammen, um ebenfalls die Abläufe dem bisher üblichen Vorgehen gegenüberzustellen.

len. In den folgenden Unterabschnitten werden alle notwendigen Festlegungen für eine adäquate Evaluation vorgestellt und erläutert.

### 6.1.1 Erläuterungen und Festlegungen zur Evaluation

Um eine optimale und vergleichbare Auswertung und Evaluation des hier entwickelten Verfahrens durchführen zu können, müssen einige Anforderungen an die Datengewinnung und -verarbeitung erfüllt sein. Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist der Prozess des Messens bei der industriellen Computertomographie einer Vielzahl von Einflussgrößen unterlegen. Um die Unvollkommenheit eines Messergebnisses zu erfassen, wird die sogenannte Messunsicherheit bestimmt. Diese ist nach DIN 1319 T1 [Deu95] ein „Kennwert, der aus Messungen gewonnen wird und der zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereichs für den wahren Wert der Messgröße gilt“. Es gilt also

$$\text{Messergebnis} = \text{Messwert} \pm \text{Messunsicherheit}.$$

Der Hardwareaufbau, die Einstellparameter, der verwendete Rekonstruktionsalgorithmus sowie diverse weitere Verarbeitungsschritte der Sensordaten liefern bei der CT Beiträge zur Messunsicherheit. Auch das Bauteil selbst trägt mit Material- und Geometrieigenschaften zur Variation der Ergebnisqualität bei. Darum ist es nahezu unmöglich den gesamten Messprozess mathematisch zu erfassen. Somit ist beispielsweise der weltweite Standard zur einheitlichen Bestimmung der Messunsicherheit GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [ISO08] im Allgemeinen nicht optimal auf die CT-Technologie übertragbar. In der Praxis der industriellen CT wird die Messunsicherheitsbestimmung mit kalibrierten Werkstücken als geeignet angesehen. Das Vorgehen ist für Koordinatenmessgeräte in DIN EN ISO 15530-3 [Deu12] beschrieben. Dabei handelt es sich um ein experimentelles Verfahren zur Ermittlung der aufgabenbezogenen Messunsicherheit. Der wesentliche Gedanke besteht darin, dass ähnliche Bauteile genutzt werden wie bei der späteren Anwendung. Diese werden mit genauere Sensorik vorab kalibriert, häufig mit taktilen oder optischen Systemen, und dienen als Referenz für die Ergebnisse der CT-Aufnahmen. In dieser Arbeit wird die Evaluation in Anlehnung an die beschriebenen Hintergründe in Relation zu bestehenden Verfahren der Oberflächenerzeugung durchgeführt. Das bedeutet, es werden unterschiedliche Messaufgaben definiert und für diese entsprechende Referenzbauteile, -messungen und -verfahren festgelegt. Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Verfahren zu erlangen, müssen alle Einflüsse des Messprozesses ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund werden für alle Auswertungsschritte und -aufgaben den unterschiedlichen Verfahren dieselben CT-Datensätze zugrunde gelegt. Das bedeutet, die Hardwareinflüsse sowie verschiedene Rekonstruktionsverfahren werden außer Acht gelassen. Einige für die Praxis relevante, softwaretech-

nische Nachbearbeitungsschritte finden in den folgenden Untersuchungen durchaus Berücksichtigung. Hiermit wird zwar keine absolute Messunsicherheit des gesamten Prozesses für die getesteten Oberflächenextraktionsmethoden ermittelt, jedoch eine relative Ergebnisvariation zu bekannten, evaluierten Verfahren aufgezeigt um eine Einordnung zu ermöglichen. Zur Bestimmung von Abweichungen wird auf etablierte und gängige Kenngrößen der Koordinatenmesstechnik zurückgegriffen. Dabei werden vorwiegend die Antastabweichung Maß  $PS$  mit

$$PS = D - D_{kalib},$$

also die Differenz zwischen dem gemessenen Wert  $D$  und dem kalibrierten Wert  $D_{kalib}$ , und die Antastabweichung Form  $PF$  mit

$$PF = R_{max} - R_{min},$$

die Differenz des minimalen und maximalen Abstands zum festgelegten Punkt des Ausgleichselements, z.B. zum Mittelpunkt einer Kugel. Außerdem lässt sich noch die Längenmessabweichung  $E$  bestimmen mit

$$E = L - L_{kalib}.$$

Hier werden Abstände und Längen zwischen Elementen bestimmt. Es handelt sich um einen globalen Fehler. Für diese Größen wird jeweils ein gerätespezifischer Kennwert  $MPE$  (maximum permissible error) angegeben. In den hier durchgeführten Auswertungen wird die Längenmessabweichung exemplarisch an einem Bauteil aufgezeigt. Darüber hinaus wird die Wurzel des quadratischen mittleren Fehlers, kurz  $RMS$ , berechnet mit

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,Ist} - x_{i,Soll})^2}{n}},$$

wobei es sich bei  $x_{Soll}$  um den Lotfußpunkt von  $x_{Ist}$  auf dem Sollmodell bezüglich der lokalen Normalenrichtung und bei  $n$  um die Gesamtanzahl aller Werte handelt.

Für die real aufgenommenen CT-Daten kommt vorwiegend das am Fraunhofer IPA vorhandene Multisensor-Koordinatenmessgerät der Firma Werth Messtechnik GmbH, das Tomoscope<sup>®</sup>HV 500 [Werb], zum Einsatz. Es handelt sich um einen 3D-CT mit Kegelstrahl, kleinem Öffnungswinkel (ca. 10 Grad) und einem großem Abstand zwischen Quelle und Detektor (2400 mm). Dieser Aufbau ermöglicht sowohl die Erfassung großer Bauteile bis ca. 400 mm Höhe und Durchmesser, als auch die Vergrößerung kleiner Bauteile maximal bis zu 5-6  $\mu m$  Strukturauflösung. Der Flachdetektor mit 2000 x 2000 physikalischen Pixeln kann durch Summierung benachbarter Pixel

virtuell verkleinert werden, was in der Praxis und auch in den folgenden Auswertungen verwendet wird. Der Grund liegt im Wesentlichen in der angemessenen Aufnahmedauer und Datenmenge der Ergebnisvolumen. Dieses System verfügt neben der CT auch über taktile, optische und hochgenaue optisch-taktile Sensoren (Fasertaster [Wera]), welche zur Kalibrierung der jeweiligen Messaufgabe herangezogen werden. Darüber hinaus sind in der zugehörigen Software Verfahren zur Filterung der Oberflächendaten des Marching Cubes Algorithmus integriert, welche in dieser Evaluierung nur am Rande berücksichtigt werden. Weitere Spezifikationen des Systems sind Abbildung 6.1 zu entnehmen.



Abbildung 6.1: Genutztes Messsystem TomoScope®HV 500 der Firma Werth Messtechnik GmbH

Die Kennwerte des Koordinatenmessgeräts TomoScope®HV 500 sind beispielhaft für verschiedene Vergrößerungsstufen Tabelle 6.1 zu entnehmen. Wie bereits erwähnt, wird mit Hilfe von Tiefpassfilterung der Oberflächendaten, dem sogenannten Stachelfilter, eine deutlich geringere Messabweichung erreicht, jedoch werden für den Vergleich in der vorliegenden Auswertung zumeist lediglich die Kennwerte der Rohdaten für den Marching Cubes Algorithmus herangezogen. Dies dient der Vergleichbarkeit der Verfahren ohne zusätzliche Einflüsse.

Vergrößerungsstufe	$MPE_{PS}$ [ $\mu m$ ]		$MPE_{PF}$ [ $\mu m$ ]	
	Rohdaten	Gefiltert	Rohdaten	Gefiltert
10 L	9	9	9	4,5
16 L	9	9	9	4,5
25 L	9	9	9	4,5
50 L	9	9	9	6,5
100 L	40	24	30	18
200 L	50	26	40	24
400 L	60	28	50	30

Tabelle 6.1: Kennwerte in  $\mu m$  des TomoSope®HV 500 der Fa. Werth Messtechnik

Der Zahlenwert im Namen der Vergrößerungsstufe entspricht ungefähr der resultierenden Voxelgröße in  $\mu m$ . Es handelt sich bei der Angabe “L“ um die Zusammenfassung von jeweils vier Pixeln und einer effektiven Detektorauflösung von 1000 x 1000 Pixeln. Die Längenmessunsicherheit des Messgeräts im 3D ist laut Prüfzertifikat

$$MPE_{E_3} = \left(4,5 + \frac{L}{75}\right)\mu m,$$

wobei hier  $L$  der erfassten Länge entspricht, welche in dieser Formel in  $mm$  angegeben werden muss. Dies gilt wiederum für gefilterte, korrigierte Oberflächendaten. Die Spezifikation dieser Größen erfolgt in Anlehnung an die VDI Richtlinie 2630 (Blatt 1.3) [VDI12] bzw. an die DIN ISO 10360, in welcher vorgesehen ist, das Ausgleichselement für 25 Punkte der Oberfläche zu berechnen und dies zur Bestimmung der Kennwerte zu nutzen. Weitere Details zur Spezifikation der Messunsicherheit der Koordinatenmessgeräte mit CT der Fa. Werth ist [CN11] zu entnehmen.

### 6.1.2 Testkörper und Referenzverfahren

Die definierten Referenzkörper bzw. -daten wurden mit dem Fokus auf ausreichende und vergleichbare Erfassungsmöglichkeiten der Kenngrößen ausgewählt. Dabei erfolgte zum einen eine Orientierung an dem üblichen Testkörper „Kugel“, der zur Überprüfung von Messabweichungen bzw. der Kennwerte  $MPE$  des CT-Systems durch den Hersteller genutzt wird. Zum anderen wurde ein Probekörper für typische Messaufgaben aus Aluminium herangezogen, um einen Vergleich der Abweichungen der Verfahren an realistischen Bauteilen aufzuzeigen. Die ersten Untersuchungen erfolgen an einem simulierten Datensatz. Dies ist eine Kugel, deren Projektionsbilder und Absorptionsverhalten analytisch berechnet wurden. Damit handelt es sich bei dem virtuellen Referenzkörper theoretisch um eine perfekte Form, deren Kenngrößen als ideal angenommen werden können. Praktisch sind im rekonstruierten CT-Volumen der simulierten Kugel unter anderem die Einflüsse der Kegelstrahlgeometrie im verwendeten Rekonstruktionsalgorithmus und die daraus folgenden Abweichungen in der extrahierten Oberfläche erkennbar (siehe 6.5). Die Abnahme des CT-Systems erfolgt üblicherweise mittels präzisen, auf Kunststoffstäben befestigten Glaskugeln, welche fest im Drehteller verschraubt werden. Zur Bestimmung der Messabweichungen für die Vergrößerungsstufe mit einer resultierenden Voxelgröße von ungefähr  $100 \mu m$  wird beispielsweise eine Glaskugel mit einem Durchmesser von  $25 mm$  verwendet, bei höheren Vergrößerungen eine  $6 mm$ -Kugel. Es gilt wiederum nach VDI-Richtlinie 2630, dass das Objekt nicht mehr als ein Viertel des Detektors einnehmen sollte. Diese Kugeln besitzen jeweils einen Kalibrierschein von zertifizierter Stelle mit präzisen Angaben zum tatsächlichen, taktil ermittelten Durchmesser. Die Glaskugeln werden als weitere Testbauteile zum qualitativen Vergleich unterschiedlich erzeugter Oberflächen dienen. Darüber hinaus wurde die  $25 mm$ -Kugel

teilweise mit einem zweiten, flexiblen Material ummantelt, welches keinen bzw. vernachlässigbaren Einfluss auf die Form hat. Dieser Versuch dient dem Zweck der Bestimmung des Verhaltens der untersuchten Verfahren bei variierenden Materialübergängen an der zu extrahierenden Oberfläche, also einerseits Luft-Material- und andererseits Material-Material-Übergänge. Um die Eignung des neu entwickelten Verfahrens für beliebige Messaufgaben zu prüfen sowie die verschiedenen Parametrierungsmöglichkeiten zu evaluieren, kommt ebenfalls ein praxisnaher Testkörper zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein Bauteil aus Aluminium mit zylindrischen und planaren Elementen. Alle Testobjekte sind in Abbildung 6.2 abgebildet.

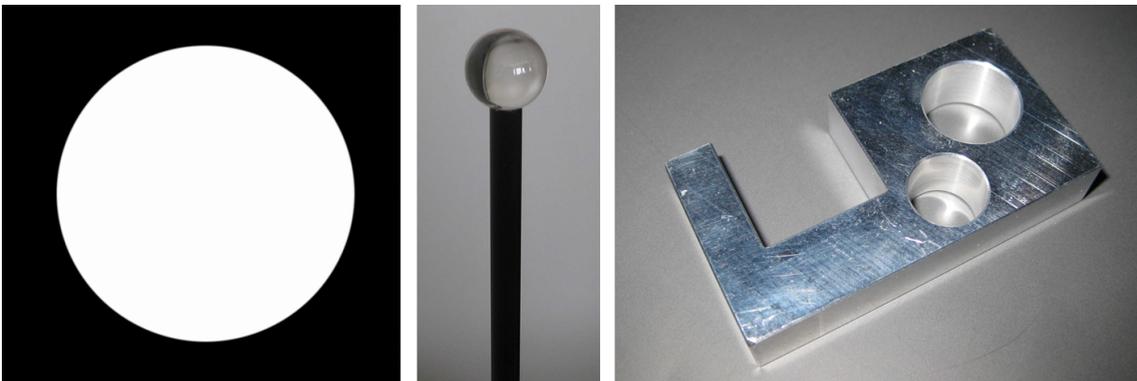


Abbildung 6.2: Testobjekte zur Genauigkeitsevaluation: Schnittbild durch simulierte Kugel (links), Foto der 25 mm Glaskugel (Mitte) und Foto des Aluminiumbauteils (rechts)

Als Referenzdaten dienen häufig hochgenaue Tasterpunkte, welche für einzelne Geometrieelemente bestimmt und ausgewertet werden. Bei dem hier verwendeten Taster handelt es sich um das taktile Messsystem TP200 der Firma Renishaw, dessen Mess- bzw. Antastunsicherheit vom Hersteller im 3D mit  $\pm 1 \mu\text{m}$  angegeben wird [Ren]. Für alle unterschiedenen Testobjekte stehen CAD-Daten zur Verfügung, welche neben der Initialisierung ebenso für den Abgleich der Koordinatensysteme von Referenzdaten und CT-Daten genutzt werden. In der Tabelle 6.2 sind die Testkörper und ihre Gegebenheiten zusammengefasst und werden im Folgenden mit den entsprechenden Namen oder Buchstaben A-D bezeichnet. In erster Linie sollen hiermit die Ergebnisse der aufgabenbasierten Oberflächenextraktion mit dem Stand der Technik verglichen werden. Dazu wird der ursprüngliche Marching Cubes Algorithmus mit automatisch bestimmtem Schwellwert als Referenzverfahren definiert. Diese Schwellwerte sind in der letzten Zeile für jeden Datensatz aufgeführt. Dabei handelt es sich um eine automatische Schwellwertbestimmung, die speziell bei Werth Messtechnik GmbH zur Oberflächenberechnung aus CT-Daten genutzt wird und deren Funktionsweise nicht bekannt ist. Da die Glaskugeln die zentralen Bauteile bei Gerätespezifikation sind, werden neben dem Multimaterialversuch zusätzlich mehrere Vergrößerungsstufen betrachtet.

Bezeichnung	A	B	C	D
Testobjekt	Perfekte Kugel	Glaskugeln	Glaskugel mit 2. Material	Aluminiumbauteil
Referenzdaten	Feste Geometrie	Kalibrierschein	Kalibrierschein	Tasterdaten
Objektgröße (ideal)	$\varnothing 6,000 \text{ mm}$	$\varnothing 24,995 \text{ mm}$ $\varnothing 5,9985 \text{ mm}$	$\varnothing 25,0014 \text{ mm}$	$40 \times 75 \times 15 \text{ mm}^3$
Voxelauflösung	$12,502 \mu\text{m}$	$101,085 \mu\text{m}$ $51,368 \mu\text{m}$ $17,562 \mu\text{m}$	$51,384 \mu\text{m}$	$110,113 \mu\text{m}$
Pixelgröße Detektor (effektiv)	$0,2 \text{ mm}$	$0,4 \text{ mm}$	$0,4 \text{ mm}$	$0,4 \text{ mm}$
Vergrößerung	16-fach	4-fach 8-fach 25-fach	8-fach	3,6-fach
Dimensionen in <i>Voxel</i> <sup>3</sup>	991x991x950	991x991x354 991x991x113 991x991x328	991x991x588	991x991x898
Röntgenspannung <i>kV</i>	-	150	180	200
Röntgenstrom $\mu\text{A}$	-	100	120	500
Strahlungszeit <i>ms</i>	-	500	1000	2000
Automat. Schwellwert (global)	49,61 %	41,15 % 42,72 % 39,68 %	37,09 %	44,28 %

Tabelle 6.2: Testkörper und Informationen zu dazugehörigen Datensätzen zur Genauigkeitsevaluation

Da es sich hier nicht notwendigerweise um ein Verfahren zur Genauigkeitsverbesserung der Oberflächendaten, sondern um ein aufgabenoptimiertes Vorgehen handelt, wird im Weiteren das verbesserte Vorgehen anhand realer Aufgabenstellungen aufgezeigt und exemplarisch mit bisherigen Auswerteschritten und -abläufen verglichen. Dazu werden typische und konkrete Beispiele aus der Praxis der industriellen CT ausgewählt, welche stellvertretend für eine Vielzahl an Problemstellungen die Vorteile verdeutlichen. Es handelt sich dabei zum einen um die Reduktion von Nachbearbeitungsschritten und zum anderen um das Erzeugen von Oberflächen, bei welchen Standardverfahren an ihre Grenzen stoßen.

### 6.1.3 Versuchsplan

#### 6.1.3.1 Versuche mit idealer Kugel (A)

Dieses simulierte Bauteil besitzt im CT-Volumen einen starken Kontrastunterschied und deutlichen Übergang zwischen Luft und Material, wie in Abbildung 6.2 zu sehen ist. Außerdem ist bei der simulierten Kugel kein Einpassungsschritt notwendig. Aus diesem Grund eignet sich dieser Testdatensatz zur Evaluation der grauwertbasierten Energieminimierung und wird jeweils für die verschiedenen implementierten Formen der Grauwertenergie mit unterschiedlich feinen Initialoberflächen bestimmt. Die Auswertung beinhaltet eine geometrische Überprüfung der Ergebnisnetze bezüglich Form und Durchmesser sowie einen direkten Vergleich zu den Marching Cubes Daten. Vor allem letzteres spielt hier eine Hauptrolle, da sich dieses Versuchsobjekt besonders für die Untersuchung der Ähnlichkeit zum Verhalten des Marching Cubes Algorithmus eignet. Als Ausgangsdatensatz dient das CAD-Modell, das mit den Parametern aus Tabelle 6.3 trianguliert wird. Für die einzelnen Versuche sind

Bezeichnung	Max. Abweichung	Max. Kantenlänge	Anzahl result. Punkte
MC	-	-	1085898
(A)a	0,1	1,0	1090
(A)b	0,01	0,1	119040

Tabelle 6.3: Initialisierungen für ideale Kugel, Maßangaben in *mm*

die meisten Eingabeparameter identisch. Die Grauwertprofilgröße beträgt  $\pm 20$  Voxel und die maximale Anzahl an Iterationen damit 10, die Gewichtung der Energien liegt vollständig auf  $E_{V_{ox}}$  und die Unterteilung für die Subvoxelunterteilung wird für einen Bereich  $\pm 2$  mit Faktor 0,05 der ursprünglichen Voxelgröße durchgeführt, wobei es sich wiederum um einen Faktor bezüglich der Voxelauflösung handelt. Die Versuche sind folgendermaßen definiert

**V1** Angabe von  $NomGW = 127$  und Nutzung des Pseudo Marching Cubes,

**V2** Nutzung von  $E_{Mat(Side)}$  mit Seitenwahl „außen“ (positive Normalenrichtung),

**V3** Nutzung von  $E_{Grad}$ , also Suche nach dem größten Gradienten.

### 6.1.3.2 Versuche mit Glaskugeln (B)

Die Versuchsdurchführung mit den beiden Glaskugeln erfolgt in Anlehnung an das übliche Verfahren zur Überprüfung der Gerätekennwerte. D.h. es werden dieselben Datensätze für die verschiedenen Vergrößerungsstufen herangezogen und die Rohdaten des Marching Cubes Algorithmus mit den neuen Ergebnissen hinsichtlich der Form- und Maßabweichung verglichen. Die Einhaltung der Kennwerte  $MPE$  spielt in dieser Auswertung eine wichtige Rolle. Zur Evaluierung wird eine repräsentative Auswahl an Vergrößerungsstufen festgelegt: 100L für die 25 mm-Glaskugel sowie 50L und 16L für die 6 mm-Glaskugel. Die initiale Triangulierung erfolgt jeweils mit verschiedenen Parametersätzen, wobei diese so gewählt werden, dass die Netze hinsichtlich der Punktzahl und -dichte den dazugehörigen Marching Cubes Daten ähneln, siehe Tabelle 6.4. Für die einzelnen Versuche sind einige Eingabeparameter

Bezeichnung	Max. Abweichung	Max. Kantenlänge	Anzahl result. Punkte
MC 100L	-	-	245977
(B)a	1,0	0,24	221069
MC 50L	-	-	53406
(B)b	1,0	0,11	61672
MC 16L	-	-	455620
(B)c	1,0	0,05	333104

Tabelle 6.4: Initialisierungen für Glaskugeln, Maßangaben in  $mm$

in Abhängigkeit der Auflösung definiert. Die Grauwertprofilgröße beträgt  $\pm 15$  Voxel und die maximale Anzahl an Iterationen damit 7. Die Gewichtung der Energien liegt wieder vollständig auf  $E_{Vox}$  und die Subvoxelunterteilung wird für einen Bereich  $\pm 2$  mit Faktor 0,1 der ursprünglichen Voxelgröße durchgeführt, wobei es sich hierbei wiederum um einen Faktor bezüglich der Voxelauflösung handelt. Die Versuche sind folgendermaßen definiert:

**V1** Angabe von  $NomGW$  und Nutzung der Energie  $E_{Thresh}$ ,

**V2** Nutzung von  $E_{Mat(Side)}$  mit Seitenwahl „außen“ (positive Normalenrichtung),

**V3** Nutzung von  $E_{Grad}$ , also Suche nach dem größten Gradienten.

Darüber hinaus werden verschiedene Formen der Gewichtung getestet, um das dazugehörige Verhalten und die optimalen Parameter zu evaluieren. In Tabelle 6.5 sind die verwendeten Parametersätze für die Gewichtung bezeichnet.

<b>B</b>	Gewichtung für			
	Bez.	$E_{Vox}$	$E_{Curv}$	Subvox $E_{Vox}$
i	0,5	0,5	0,5	0,5
ii	0,8	0,2	0,3	0,7
iii	0,8	0,2	0,1	0,9

Tabelle 6.5: Gewichtungen der Energiekomponenten in den durchgeführten Versuchen

Die Auswertung mittels Einpassung von Ausgleichskugeln erfolgt mit Hilfe von WinWerth<sup>®</sup>, wobei der RMS zusätzlich mit der IPA-eigenen Software Proguugs bestimmt wird. Es wird jeweils die gesamte Punktwolke herangezogen. Folglich handelt es sich nicht um eine ISO 10360 konforme Auswertung.

### 6.1.3.3 Versuche mit Glaskugel mit zweitem Material (C)

Zusätzlich wird ein weiterer Multimaterialversuch für die 25 mm-Glaskugel, wie vorab beschrieben, durchgeführt. Hierbei soll eine Aussage über die Genauigkeit der Ergebnisdaten bei unterschiedlichen Materialien getroffen werden. Dazu wurde eine kalibrierte Glaskugel teilweise mit einem flexiblen Material ummantelt. Auch hier werden die unterschiedlichen Versuche bezüglich der Nutzung verschiedener Grauwertenergien durchgeführt und mit dem Ergebnis des Marching Cubes Algorithmus verglichen. Sinnvollerweise wird hier auf einen gegebenen Schwellwert und somit auf die Nutzung von  $E_{Thresh}$  verzichtet, da dies bei unterschiedlichen Grauwertübergängen nicht geeignet ist. Die Bezeichnungen der Versuche werden wie zuvor bei **B** beibehalten. Einzige Änderung ist die Seitenwahl „innen“ (negative Normalenrichtung) bei **V2**. Darüber hinaus erfolgt hier die Forderung einer Zusatzbedingung für die Krümmungsenergie bezüglich ihres maximalen Werts. Überschreitet die (nicht normierte) Krümmungsenergie den Wert 1,0, wird diese Position schlecht bewertet und bei der Positionsfindung ignoriert. Der Wert rührt von der ursprünglichen Krümmung der Initialoberfläche her, welche stets deutlich kleiner ist, und soll die Anzahl einzelner Ausreißer verringern.

Es handelt sich bei der Kugel zwar um ein Kalibrierteil mit bekanntem Durchmesser, jedoch ist zu erwähnen, dass die Aufnahme nicht unter Abnahmebedingungen erfolgte, wie die vorherigen CT-Messungen. Nichtsdestotrotz werden hier die notwendigen Kennwerte bestimmt. Ein Schnittbild des Voxelvolumens dieses Multimaterialobjekts ist in Abbildung 6.3 zu sehen.

Genutzt wird hierbei ein kleinerer Datensatz mit 176033 Punkten (im Vergleich zu MC mit 1112674 Punkten). Untersucht werden erneut die Parametrierungen nach Tabelle 6.5.

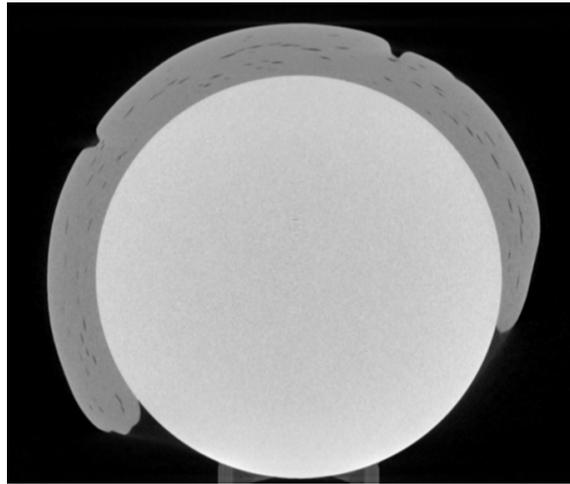


Abbildung 6.3: 25 mm Kalibrierkugel mit flexiblem Kunststoff ummantelt (Voxelschnittbild)

#### 6.1.3.4 Versuche mit Aluminiumbauteil (D)

Zur Auswertung des Aluminiumbauteils stehen als Referenzdaten hochgenaue Tasterdaten zur Verfügung, welche in Abbildung 6.4 zu sehen sind. Exemplarisch werden hier für den Vergleich zur aufgabenbasierten Extraktion regelgeometrische Elemente ausgewählt. Zur Generierung der Initialoberflächen steht das CAD-Modell zur Verfügung. In Abb. 6.4 werden zwei Zylinder, sowie zwei Ebenen in die Tasterpunktswolke eingepasst, welche hier als Grundlage dienen sollen. Die hieraus ermittelten Zylinderdurchmesser betragen 20,034 mm und 15,032 mm. Zusätzlich werden die Abstände der einzelnen Tasterpunkte zur extrahierten Oberfläche sowie der Abstand der beiden Ebenen verglichen. Der Kennwert  $MPE_{E_3}$  lässt sich mit obiger Formel berechnen zu

$$MPE_{E_3} = \left(4,5 + \frac{10,038}{75}\right) \mu m = 4,63384 \mu m,$$

wobei der Wert  $L = 10,038 mm$  aus der Distanz der Ebenen aus dem CAD-Modell ermittelt wurde.

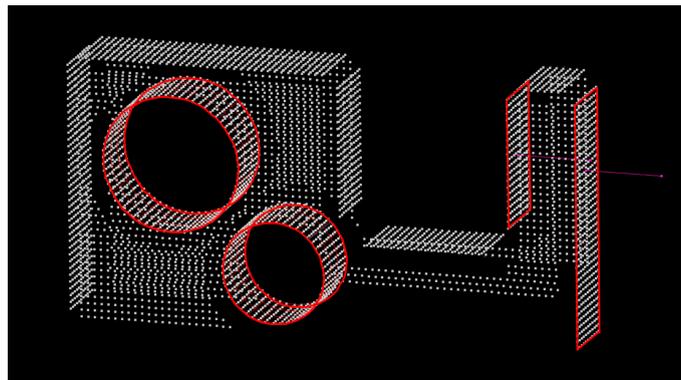


Abbildung 6.4: Tasterpunktswolke des Aluminiumbauteils

Als Gewichtungen werden bei diesen Tests lediglich 0,8 im Voxelschritt und 0,3 im Subvoxelschritt für die Grauwertenergie genutzt (entspricht Variante ii aus Tabelle 6.5). Die Elemente werden unterschiedlich parametrisiert trianguliert, was in Tabelle 6.6 aufgelistet ist. Der Marching Cubes Datensatz bezieht sich auf das gesamte Bauteil, da keine getrennten Bereiche direkt extrahierbar sind. Ebenso sind die Tasterpunkte als gesamte Punktwolke aufgeführt.

Bezeichnung	Max. Abweichung	Max. Kantenlänge	Anzahl result. Punkte
MC	-	-	1052760
Tasterpunkte	-	-	4966
Kleine Ebene: D(KE)	1,0	0,9	2689
Große Ebene: D(GE)	1,0	0,9	4225
Kleiner Zylinder: D(KZ)	0,5	0,5	16685
Großer Zylinder: D(GZ)	0,8	0,5	10332

Tabelle 6.6: Initialisierungen für die zu untersuchenden Geometrien des Aluminiumbauteils, Maßangaben in  $mm$

Die Versuche bezüglich der Energienutzung entsprechen erneut denen der Glaskugeln:

- V1** Angabe von  $NomGW = 113$  und Nutzung der Energie  $E_{Thresh}$ ,
- V2** Nutzung von  $E_{Mat(Side)}$  mit Seitenwahl „außen“ (positive Normalenrichtung),
- V3** Nutzung von  $E_{Grad}$ , also Suche nach dem größten Gradienten.

## 6.2 Ergebnisqualität im Vergleich

### 6.2.1 Ergebnisse für die ideale Kugel (A)

Die Ergebnisse der Auswertungen für die ideale Kugel entsprechend ihrem Versuchsplan sind in Tabelle 6.7 dargestellt. Der angegebene Durchmesser entspricht dem, der mittels WinWerth<sup>®</sup>eingepasster Ausgleichskugel ermittelt wurde. Die Antastabweichung Form sowie der Wert für  $RMS$  folgen aus dem Vergleich mit dem gegebenen Sollmodell. Im rechten Teil der Tabelle ist der hier interessantere Vergleich mit den Marching Cubes Daten zu finden.

Erwartungsgemäß liefert hier der Versuch V1 mit  $E_{Thresh}$  die Ergebnisse, die den Marching Cubes Daten am stärksten entsprechen. In Abbildung 6.5 ist sowohl das Marching Cubes Ergebnis, als auch das Ergebnis von V1 im farbcodierten Soll-Ist-Vergleich mit dem CAD-Modell zu sehen. Trotz sichtbar unterschiedlicher Punktdichte ist die ähnliche Tendenz erkennbar. Der Unterschied zwischen beiden Abweichungen liegt sowohl im Mittel als auch in seinen Extremwerten unter  $1 \mu m$ .

A	Soll und Kugelfit				MC		
	Bez.	Ø	PS	PF	RMS	+maxAbw	-minAbw
MC	6,000	0,000	0,00330	0,00051	-	-	-
V1a	6,000	0,000	0,00235	0,00065	0,00011	-0,00092	0,00029
V1b	6,000	0,000	0,00321	0,00063	0,00062	-0,00067	0,00026
V2a	6,001	-0,001	0,00644	0,00171	0,00197	-0,00378	0,00119
V2b	6,001	-0,001	0,00875	0,00122	0,00335	-0,00294	0,00089
V3a	6,001	-0,001	0,00631	0,00168	0,00197	-0,0027	0,00117
V3b	6,001	-0,001	0,00866	0,00122	0,00336	-0,00358	0,00089

Tabelle 6.7: Datenauswertung für ideale Kugel: Vergleich mit Sollmodell und Vergleich mit Marching Cubes Daten, alle Angaben in *mm*

In den Abbildungen 6.6 und 6.7 sind die Unterschiede aller drei Versuchsergebnisse zum Marching Cubes Netz aufgetragen. Man beachte die unterschiedlichen Skalierungen der Farbkodierung, die jeweils für die Extreme entsprechend der Tabelle 6.7 optimiert wurden.

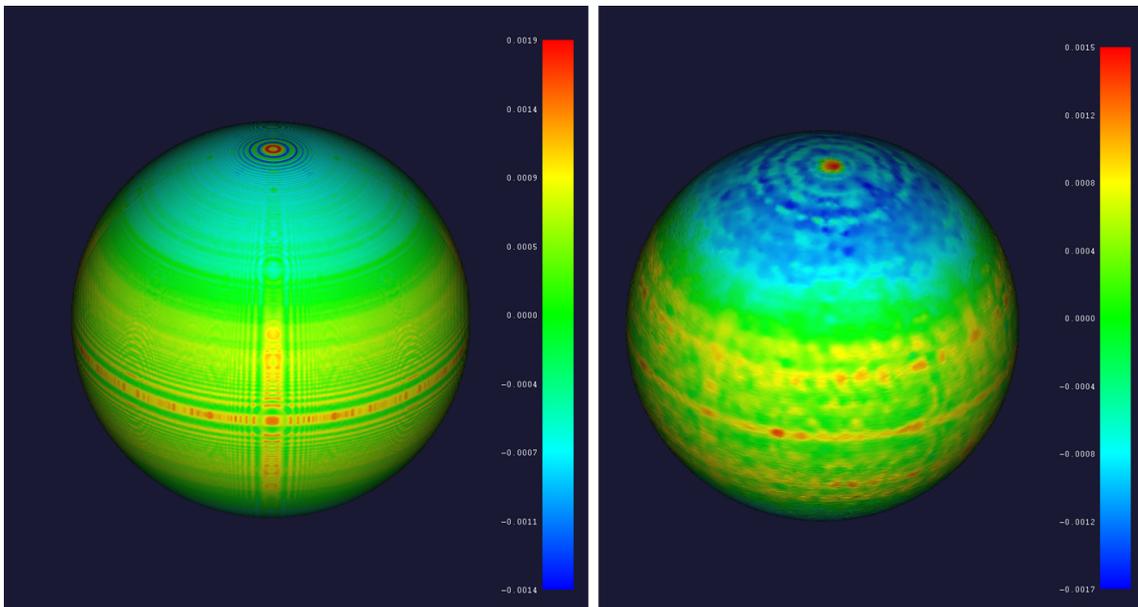


Abbildung 6.5: Soll-Ist-Vergleich zum CAD-Modell der perfekten Kugel (Ø 6mm) mit dem vollständigen MC-Netz (links) und mit dem Ergebnisnetz (A)b (rechts)

Obwohl die beiden Vorgehen in V2 und V3 nach der voxelgenauen Energieminimierung unterschiedliche Ergebnisse liefern, führt das gleiche Vorgehen bei der Subvoxelsuche zu einem sehr ähnlichen Ergebnis. Beide Netze waren folglich bereits nach dem ersten Schritt innerhalb des gleichen Interpolationsbereichs. Auch wenn die maximalen Abweichungen bei beiden Versuchen deutlich größer sind, so zeigt der Soll-Ist-Vergleich und der *RMS*, dass es sich dabei vorwiegend um Ausreißer handelt. Der mittlere Fehler bleibt im Bereich  $1 \mu\text{m}$ . Jedoch sind auffällige Formabweichungen zu sehen, die zu einem leicht abweichenden Durchmesser der eingepassten Kugel

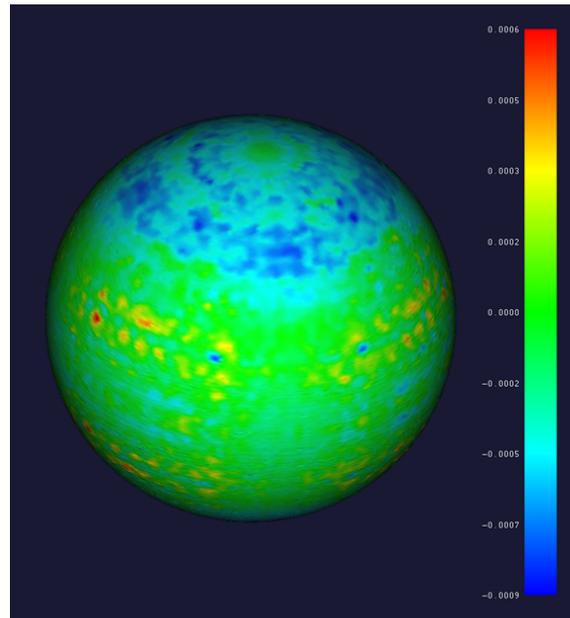


Abbildung 6.6: Soll-Ist-Vergleich zwischen MC-Daten und Ergebnisnetz (A)b aus V1

führen. Dies liegt darin begründet, dass der hier gegebene Übergang nahezu linear verläuft, weshalb es bei der Gradientenbestimmung leicht zu Sprüngen zwischen Nachbarpunkten kommen kann. Dies wird ausgeglichen, wenn zusätzlich ein Anteil der Krümmungsenergie berücksichtigt wird. In Abbildung 6.8 ist der Vergleich der Ergebnisse mit und ohne Krümmungsfaktor bezüglich dem Marching Cubes Datensatz dargestellt. In der Abbildung wurden die Farbkodierungen vergleichbar skaliert. Die Gewichtung ist hier auf 0,8 zugunsten der Krümmung festgelegt. Offensichtlich wird eine deutlich glattere Oberfläche erreicht. Der *RMS* zum Marching Cubes reduziert sich auf 0,00077. Jedoch entstehen Abweichungen im Bereich der Kuppe, an welcher die Kegelstrahlartefakte auftreten, da sich hier der geringe Einfluss der Grauwerte durch schlechteren Kontrast besonders stark auswirkt.

### 6.2.2 Ergebnisse für die Glaskugeln (B)

Bei diesen Versuchen soll neben der Evaluation der Ergebnisqualität das Zusammenspiel der Teilenergien dargestellt werden. Der Vergleich erfolgt mit den Dreiecksnetzen der Marching Cubes Daten. In den Tabellen 6.8 bis 6.10 sind die ermittelten Kennwerte der durchgeführten Versuche aufgeführt. Zur Einordnung der Größen werden die jeweiligen *MPE*-Werte der Spezifikation der einzelnen Stufen hinzugefügt. Diese Kennwerte beziehen sich auf die Geräteabnahme in Anlehnung an die ISO 10360, also der Nutzung von 25 Punkten. Die Daten der Tabelle entstanden jedoch unter Nutzung des gesamten Dreiecksnetzes, auch im Fall der Marching Cubes Daten. Das erklärt, dass diese teilweise größere Abweichungen aufweisen als erwünscht. Zum Vergleich wurde jeweils die Auswertung nach ISO 10360 zusätzlich aufgeführt,

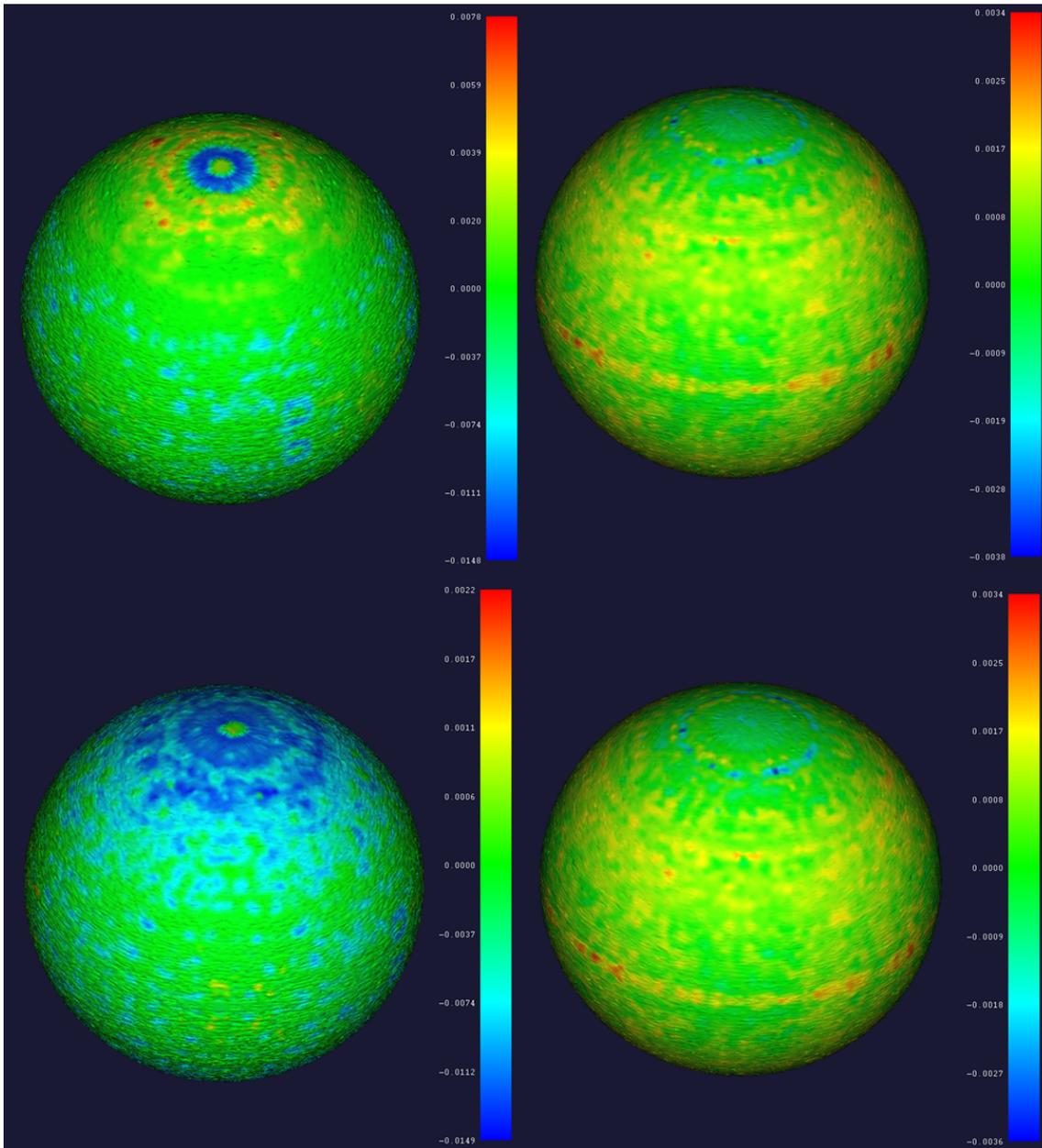


Abbildung 6.7: Soll-Ist-Vergleich zwischen MC-Daten und Ergebnisnetzen (A) b V2 vor (oben links) und nach der Subvoxelunterteilung (oben rechts) und V3 vor (unten links) und nach der Subvoxelunterteilung (unten rechts)

sodass die Erfüllung der Gerätespezifikation als gewährleistet angenommen werden kann.

In den Ergebnissen sind mehrere Tendenzen zu beobachten. Zunächst wird deutlich, dass die Antastabweichung bezüglich des Durchmessers stets im Bereich der angegebenen Toleranzen bleibt und bei einigen Parametrierungen ebenfalls die Anforderungen an die gefilterten Datensätze erfüllt. Dies ist vor allem bei hoch gewichteter Krümmungsenergie während der Subvoxelsuche gegeben, da hier indirekt eine Glättung erfolgt. Anders verhält es sich mit den Antastabweichungen die Form betreffend.

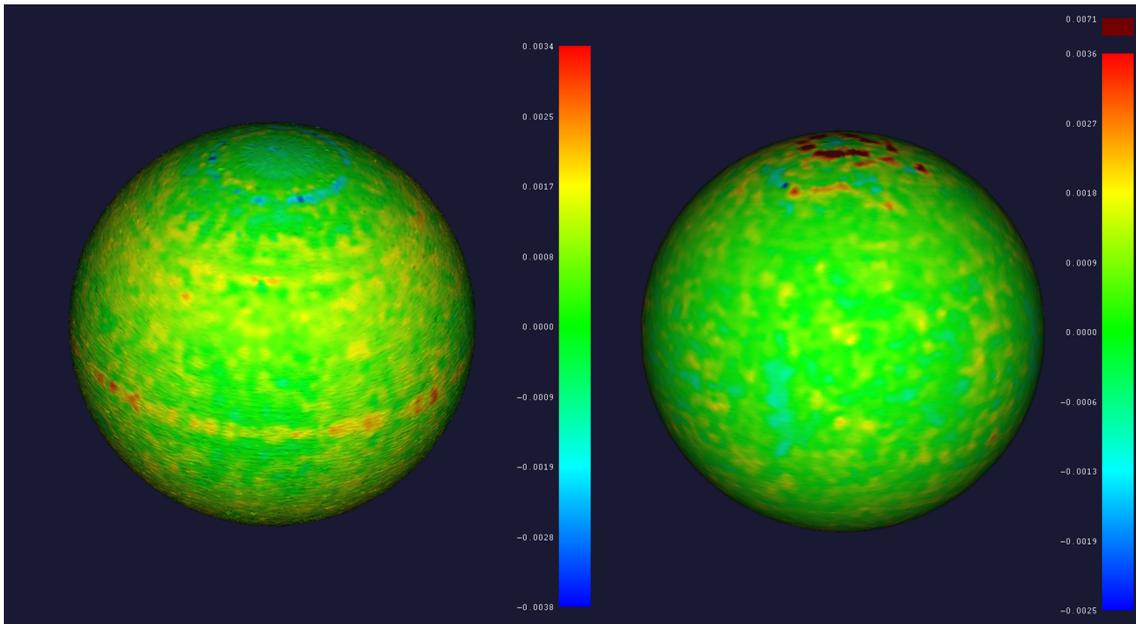


Abbildung 6.8: Soll-Ist Vergleich des Ergebnisnetzes von V2 b zum Marching Cubes Netz ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung der Krümmungsenergie

Diese weichen teilweise stark von den Anforderungen ab. Es lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Voxelgröße und der Formabweichung feststellen, sodass diese Problematik bei kleineren Auflösungen wie bei 50L und 16L weniger schwer wiegt. Das bedeutet, dass Schwankungen innerhalb des Grauwertprofils von  $\pm 1$  Voxel zu derartigen Werten führen. Erwartungsgemäß verringert sich dies mit stärker gewichteter Krümmungsenergie bei der lokalen Positionssuche. Betrachtet man zusätzlich die Werte des *RMS*, so weisen diese darauf hin, dass es sich häufig nicht um ein globales Problem der Form handelt, sondern wenige Ausreißer die hohen Werte für *PF* verursachen. Bei Betrachtung des farbkodierten Soll-Ist-Vergleichs der Ergebnisse wird dieser Verdacht bestätigt, siehe Abbildung 6.9 und 6.10. Während der Großteil der Oberfläche innerhalb der Toleranzen gleichmäßig ist, stechen einzelne, stark abweichende Stellen deutlich hervor. Bei näherer Betrachtung der Bereiche, in welchen derartige Ausreißer gehäuft vorkommen, fällt auf, dass dies oft an Patchgrenzen und Extremstellen der Einzelpatches auftritt. Das verwendete Triangulationsverfahren generiert an diesen Stellen oft Dreiecke mit sehr großen, stumpfen Winkeln. Trotz der Nutzung von Methoden zur Krümmungsberechnung, die die Eigenschaft besitzen, die diskrete Krümmung für beliebige Dreiecksformen zu schätzen, führt dies hier zu Unstetigkeit. Begründet ist dies durch die Näherung der Krümmung, welche bei zu starker Irregularität eines Dreiecks größere Abweichungen als bei regulären Dreiecken aufweist. Als eine weitere Beobachtung kommt hinzu, dass ein schwacher Kontrastübergang zwischen Material und Luft eine Tendenz des Verfahrens zu stärkerer Streuung und höherer Formabweichung zeigt. Bei einer starken Variation nach der Voxelbestimmung führt die vorwiegend krümmungsbasierte Subvoxelsuche nicht

mehr zu einer Verbesserung der Gesamtform, da es prinzipiell lokal glättet und somit lediglich Abrundungen der vorhandenen Spitzen vornimmt.

Die Betrachtung der Einflüsse der Energiegewichtung wird anhand der Daten sowie anhand der Darstellung in 6.9 (am Beispiel  $E_{Thresh}$ ) deutlich, dass die grauwertbasierte Suche für die Voxel- und die krümmungsbasierte Suche für die Subvoxelbestimmung wie erwartet zu besseren Ergebnissen führt als eine gleichmäßige Gewichtung aller Teilkomponenten. Je stärker die Bedeutung der Krümmung desto geringer ist zumeist die Formabweichung. Jedoch liefert dies auch oft einen leichten Anstieg der Maßabweichung, was von der minimierenden Wirkung der geforderten Flachheitsbedingung herrührt. In den durchgeführten Untersuchungen lieferte die Parametrierung ii bei guten Kontrastübergängen die ausgewogensten Ergebnisse, was für eine gleichmäßig abwechselnde Gewichtung der Teilenergien spricht.

Bei den verschiedenen Energieformen selbst brachte erneut die Nutzung eines Schwellwerts, wie bereits bei der idealen Kugel, die besten Ergebnisse. Da es sich hier um eine typische Marching Cubes Anwendung mit nur einem Material handelt, überrascht dieser Fakt nicht. Zu bemerken ist, dass die Energie hier nach  $E_{Thresh}$  minimiert wurde anstelle der Anwendung des Pseudo-MC Vorgehens. Der Unterschied zur Gradienten- bzw. Materialsuche hält sich jedoch in angemessenen Grenzen, sodass deren Nutzbarkeit bei geeigneter Aufgabenstellung als vergleichbar betrachtet werden kann. In Abbildung 6.10 sind die verschiedenen Energien für 100L, 50L und 16L vergleichend dargestellt, mit farblich gleich skalierten Abweichungen gegenüber dem Initialmodell. Vor allem bei  $E_{Grad}$  wird wiederum der Einfluss von Ausreißern sichtbar, ohne welche starke Ähnlichkeit zu  $E_{Thresh}$  herrscht.

<b>B</b>	Kugelfit						
	<b>100L</b>	$\emptyset$ Soll	$MPE_{PS}$	$MPE_{PF}$	$\emptyset$	PS	PF
MC	24,9955	0,040	0,030	25,0410	0,0455	0,0380	0,003
MC gef.	24,9955	0,024	0,018	25,0000	0,0045	0,0170	0,002
MC gef. ISO	24,9955	0,024	0,018	25,0040	0,0085	0,0100	-
V1a i	24,9955	0,040	0,030	24,997	0,0015	0,113	0,009
V1a ii	24,9955	0,040	0,030	24,9980	0,0025	0,0640	0,004
V1a iii	24,9955	0,040	0,030	24,9980	0,0025	0,0710	0,000
V2a i	24,9955	0,040	0,030	24,9890	-0,0065	0,1160	0,018
V2a ii	24,9955	0,040	0,030	25,0050	0,0095	0,0860	0,007
V2a iii	24,9955	0,040	0,030	25,0090	0,0135	0,0830	0,005
V3a i	24,9955	0,040	0,030	24,9900	-0,0055	0,1210	0,017
V3a ii	24,9955	0,040	0,030	25,0020	0,0065	0,0760	0,005
V3a iii	24,9955	0,040	0,030	25,0030	0,0075	0,0760	0,000

Tabelle 6.8: Datenauswertung der Glaskugel für Stufe 100L: Vergleich mit kalibriertem Modell und Herstellerangaben zu Abweichungen, alle Angaben in  $mm$

<b>B</b>	Kugelfit						
<b>50L</b>	$\varnothing$ Soll	$MPE_{PS}$	$MPE_{PF}$	$\varnothing$	PS	PF	RMS
MC	5,9985	0,009	0,0065	6,0140	0,0155	0,0210	0,002
MC gef.	5,9985	0,009	0,0065	5,9990	0,0005	0,009	0,002
MC gef. ISO	5,9985	0,009	0,0065	6,0020	0,0035	0,003	-
V1b i	5,9985	0,009	0,0065	5,9990	0,0005	0,0570	0,005
V1b ii	5,9985	0,009	0,0065	5,9970	-0,0015	0,0390	0,002
V1b iii	5,9985	0,009	0,0065	5,9980	-0,0005	0,0280	0,001
V2b i	5,9985	0,009	0,0065	5,9970	-0,0015	0,062	0,009
V2b ii	5,9985	0,009	0,0065	5,9980	-0,0005	0,049	0,002
V2b iii	5,9985	0,009	0,0065	6,0040	0,0055	0,041	0,002
V3b i	5,9985	0,009	0,0065	5,9960	-0,0025	0,060	0,009
V3b ii	5,9985	0,009	0,0065	5,9980	-0,0005	0,043	0,003
V3b iii	5,9985	0,009	0,0065	6,0010	0,0025	0,0410	0,000

Tabelle 6.9: Datenauswertung der Glaskugel für Stufe 50L: Vergleich mit kalibriertem Modell und Herstellerangaben zu Abweichungen, alle Angaben in  $mm$

<b>B</b>	Kugelfit						
<b>16L</b>	$\varnothing$ Soll	$MPE_{PS}$	$MPE_{PF}$	$\varnothing$	PS	PF	RMS
MC	5,9985	0,009	0,0065	6,0090	0,0105	0,016	0,001
MC gef.	5,9985	0,009	0,0045	6,0010	0,0025	0,006	0,001
MC gef. ISO	5,9985	0,009	0,0045	6,002	0,0035	0,002	-
V1c i	5,9985	0,009	0,0065	6,000	0,0015	0,027	0,002
V1c ii	5,9985	0,009	0,0065	6,000	0,0015	0,025	0,001
V1c iii	5,9985	0,009	0,0065	6,000	0,0015	0,011	0,001
V2c i	5,9985	0,009	0,0065	6,002	0,0035	0,028	0,003
V2c ii	5,9985	0,009	0,0065	6,002	0,0035	0,021	0,001
V2c iii	5,9985	0,009	0,0065	6,002	0,0035	0,015	0,001
V3c i	5,9985	0,009	0,0065	6,002	0,0035	0,027	0,003
V3c ii	5,9985	0,009	0,0065	6,001	0,0025	0,019	0,001
V3c iii	5,9985	0,009	0,0065	6,001	0,0025	0,012	0,000

Tabelle 6.10: Datenauswertung der Glasgugel für Stufe 16L: Vergleich mit kalibriertem Modell und Herstellerangaben zu Abweichungen, alle Angaben in  $mm$

### 6.2.3 Ergebnisse für die Multimaterialkugel (C)

Bei diesem Testobjekt wurden bewusst unterschiedliche Grauwerttransitionen geschaffen, welche aber aufgrund der gegebenen Kalibrierwerte des ursprünglichen Objekts nachvollzogen werden können. Hier zeigt sich einer der eigentlichen Vorteile des neuen Vorgehens gegenüber des Marching Cubes Algorithmus. Der automatisch gefundene Schwellwert extrahiert beide Materialien und eignet sich folglich nicht zur Kugelbestimmung. Da der äußere Kunststoff eine geringere Dichte und somit niedrigere Grauwerte aufweist und im Histogramm kaum Überlappung beider Grauwertbereiche vorkommen, ist die Wahl eines höheren Schwellwerts grundsätzlich möglich. Der hier plausible Wert liegt bei 70 % der Kontrastverteilung, führt

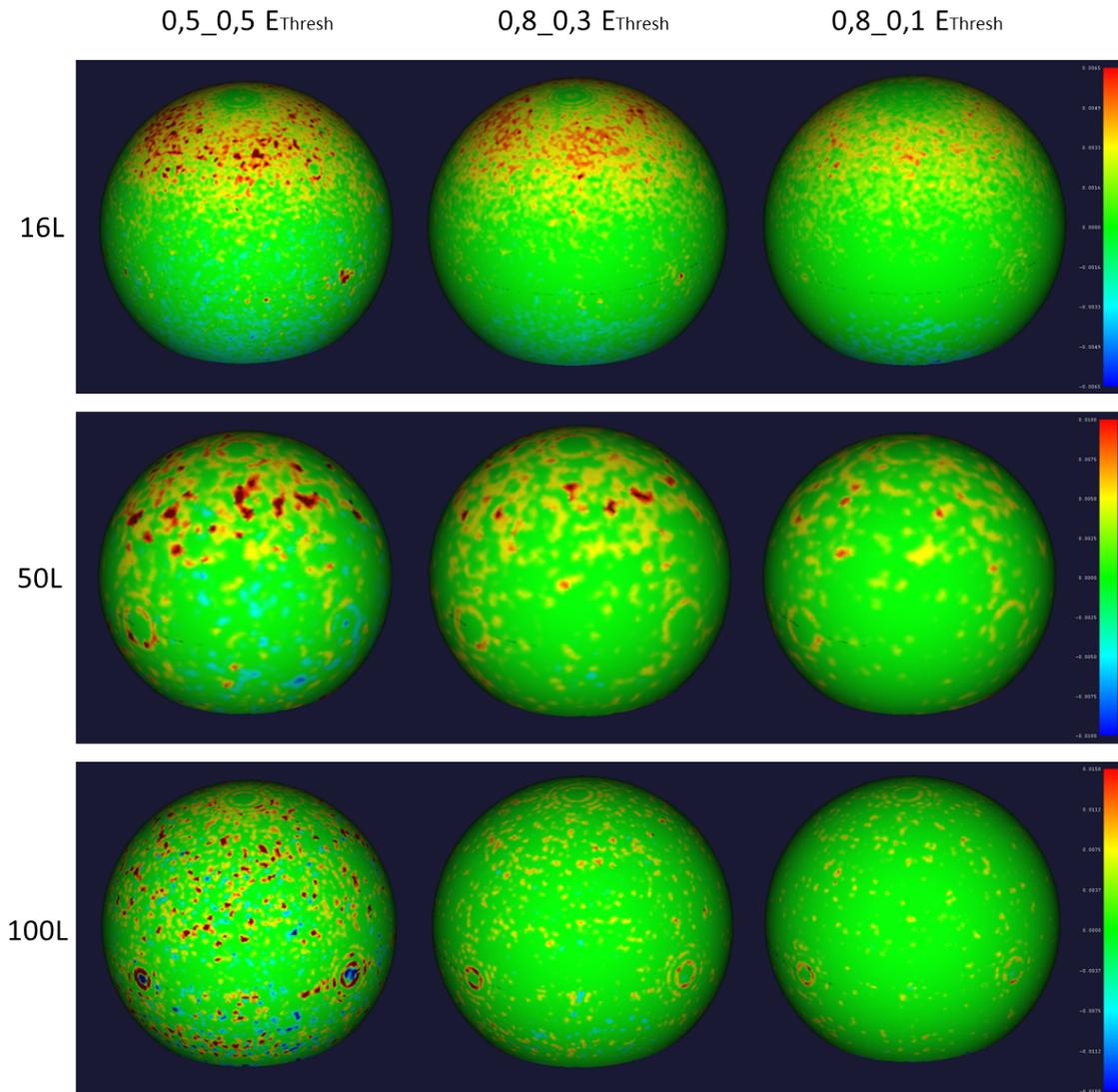


Abbildung 6.9: Soll-Ist-Vergleiche der ermittelten Oberflächen mit dem Sollmodell: Vergleich der unterschiedlichen Gewichtung am Beispiel von  $E_{Thresh}$  für 16L, 50L und 100L

jedoch nicht zu einer korrekten Oberfläche, da die unterschiedlichen Grauwertübergänge nach wie vor unterschiedliche Oberflächenpositionen erzeugen. Dieser Effekt tritt bereits bei einem automatischen Schwellwert von 37 % im Bereich der Befestigung des Stabs auf. Ebenso sind hier Restoberflächen in Form kleiner Fragmente zu sehen. In Abbildung 6.11 sind die Ergebnisse dargestellt und werden im Folgenden als Vergleichsoberflächen herangezogen.

Derartige Fragmente können bei dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Vorgehen nicht auftreten. In Tabelle 6.11 sind die Ergebniswerte der extrahierten Kugeln und in Abbildung 6.12 die passenden Visualisierungen zu finden. Diese wurden erneut mit gleicher Skalierung farbkodiert. Dass das Marching Cubes Ergebnis bei einem Schwellwert von 70 % nicht eignet ist, ist offensichtlich. In der Praxis der industriellen Computertomographie würde keine derartige Oberfläche erzeugt oder für

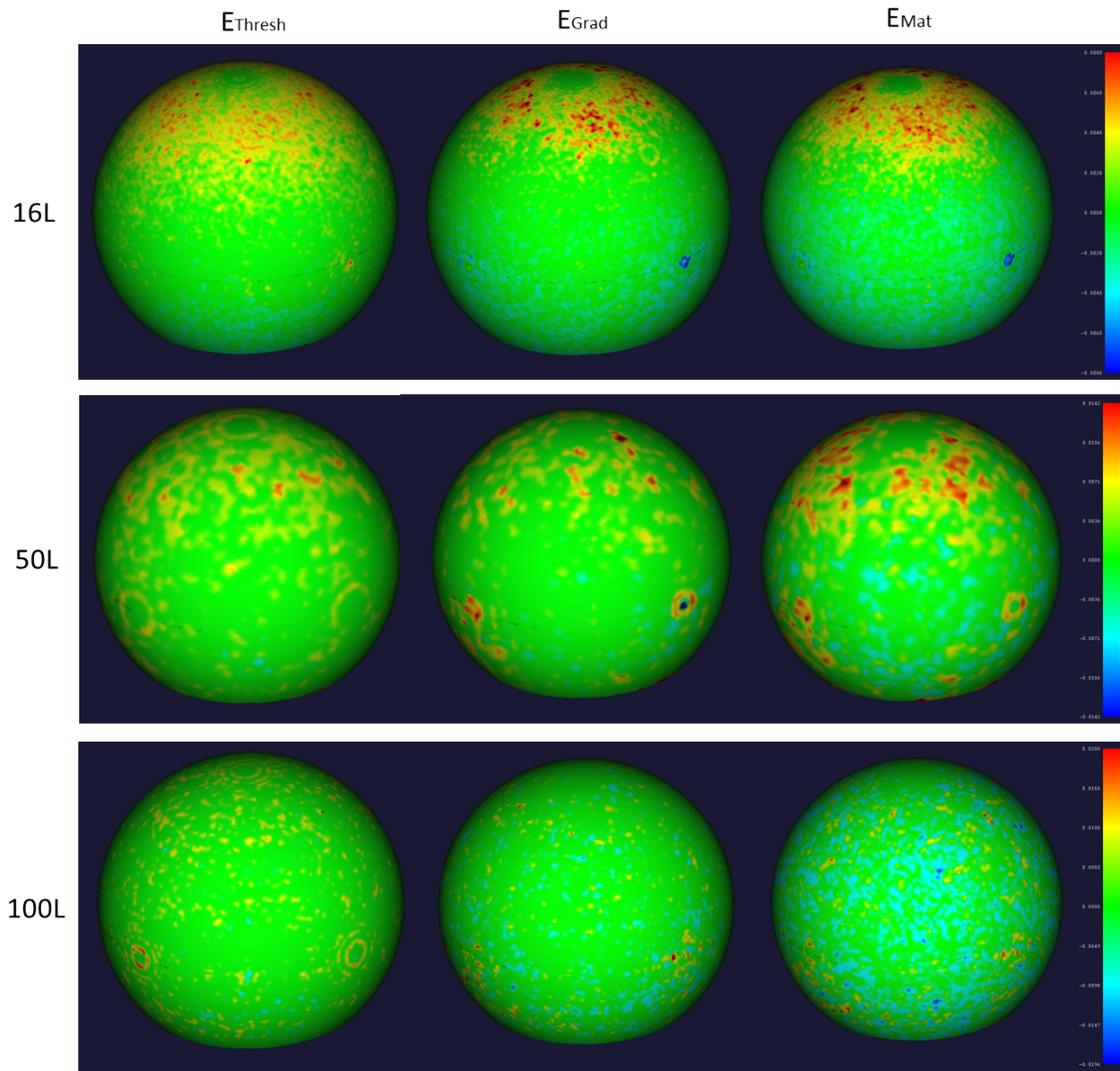


Abbildung 6.10: Soll-Ist-Vergleiche der ermittelten Oberflächen mit dem Sollmodell: Vergleich der unterschiedlichen Grauwertenergien für 16L, 50L und 100L

messtechnische Weiterverarbeitung verwendet werden. Hier ist es zum direkten Vergleich hinzugefügt. Dabei ist zu bemerken, dass die ermittelten Kenngrößen besser sind als die Kugel tatsächlich abgebildet wird, da der Bereich mit Artefakten des Kunststoffes zufällig nahe an der Solloberfläche liegt. Das Verhalten der aufgabenbasierten Oberflächenbestimmung zeigt ähnliche Tendenzen wie bereits im Versuchsteil **B**. Bei stärkerer Gewichtung der Krümmung ergibt sich eine glattere Oberfläche sowie eine Annäherung an das Sollmodell bezüglich der Maße. In den Abbildungen ist zudem erkennbar, dass auch hier mit zunehmendem Krümmungsanteil, die restlichen sichtbaren Übergangsunterschiede der Materialien abnehmen. Die Suche nach dem inneren Material mit  $E_{Mat}$  weist ein stabileres Verhalten auf als  $E_{Grad}$ . Diese Energie variiert stärker in Abhängigkeit der Krümmung. Generell ist eine größere Nähe zum Initialmodell zu beobachten, was durch die Zusatzbedingung an die Krümmungsenergie zu begründen ist, welche zu großes „Abwandern“ einzelner Punkte verhindert.

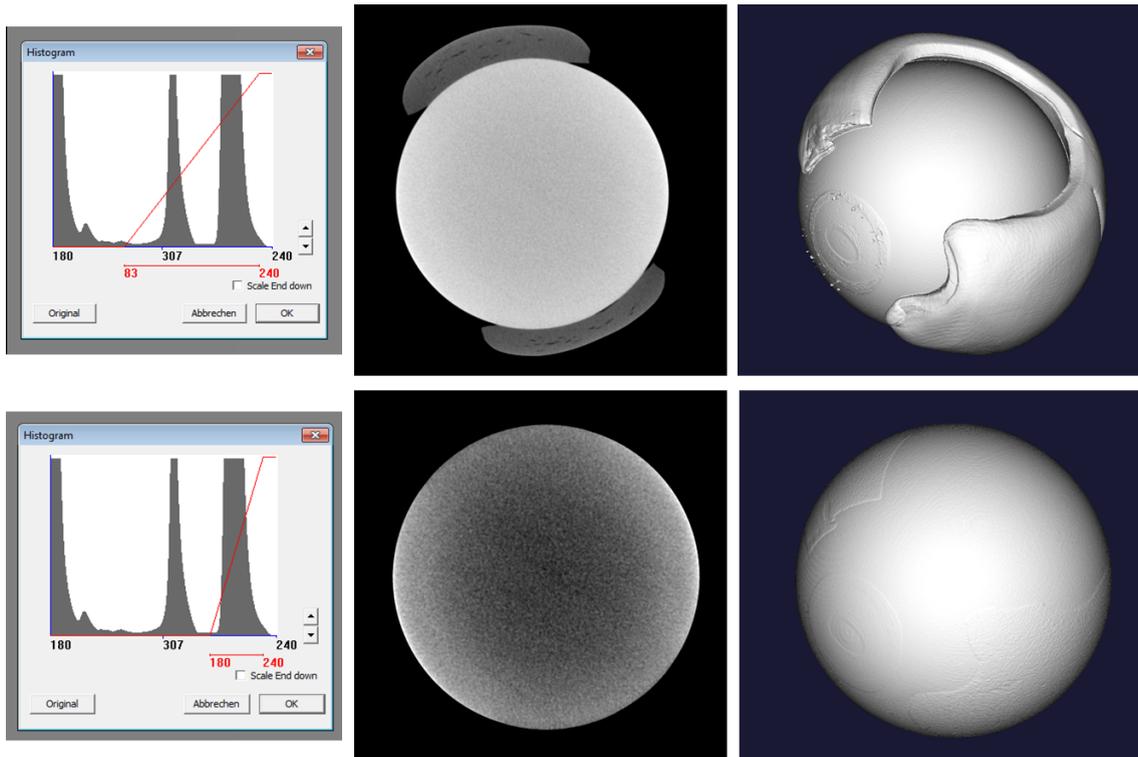


Abbildung 6.11: Ergebnisse des Marching Cubes Verfahrens für die Multimaterialkugel vergleichend dargestellt für globale Schwellwerte bei 37 % (oben) und bei 70 % (unten)

C	Kugelfit und Sollabweichungen				
	ØSoll	Ø	PS	PF	RMS
MC 70%	25,0014	24,947	-0,0544	0,0569	0,0281
V2 i	25,0014	24,994	-0,0074	0,0467	0,0051
V2 ii	25,0014	24,996	-0,0054	0,0357	0,0035
V2 iii	25,0014	24,999	-0,0024	0,0262	0,0018
V3 i	25,0014	24,988	-0,0134	0,0434	0,0082
V3 ii	25,0014	24,995	-0,0064	0,0352	0,0037
V3 iii	25,0014	25,001	-0,0004	0,0150	0,0008

Tabelle 6.11: Datenauswertung für 25 mm Glaskugel mit zweitem Material, alle Angaben in *mm*

Insgesamt erreichen die ermittelten Oberflächen, nicht zuletzt dank einer guten Initialisierung, eine sehr gute Qualität und ermöglichen die Auswertung einer Geometrie, die in dieser Form nicht mit dem herkömmlichen Vorgehen umsetzbar ist.

#### 6.2.4 Ergebnisse für das Aluminiumbauteil (D)

Im Vergleich zu den vorherigen Kugelobjekten handelt es sich bei dem Aluminiumbauteil um ein realistischeres und weniger kooperatives Beispiel. Dies ist zum einen durch die variierende Geometrie, also unterschiedliche Durchstrahlungslängen, und zum anderen durch das deutlich schlechter durchdringbare metallische Material

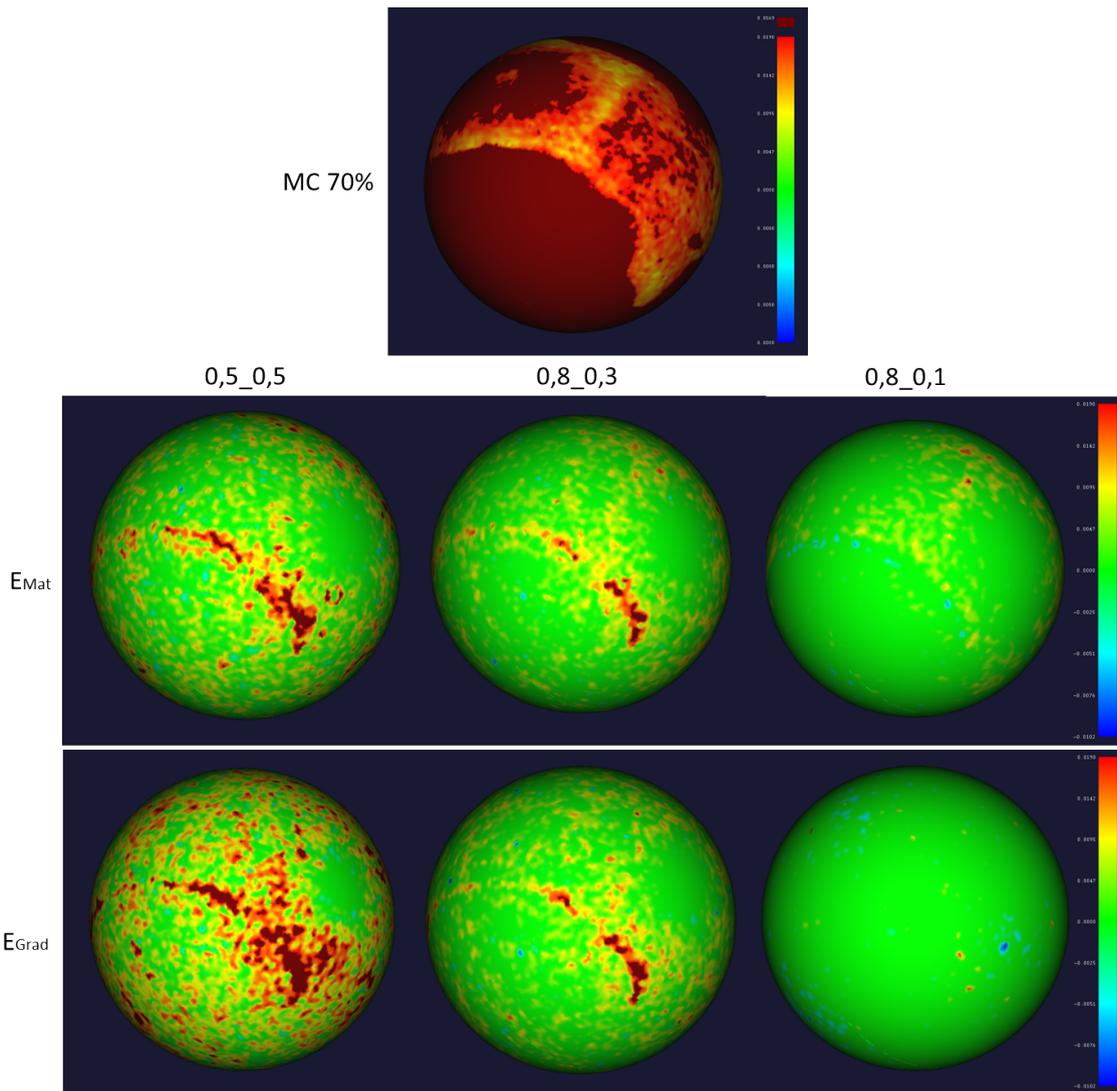


Abbildung 6.12: Vergleich der Ergebnisnetze zum Sollmodell für die Glaskugel mit zweitem Material

begründet. Um Strahlauhärtungsartefakte zu verringern, muss das Bauteil schräg aufgespannt werden. Zudem ist eine hohe Röntgenspannung sowie lange Strahlzeit pro Bild notwendig, um eine Aufnahme guter Qualität zu erhalten. In Abbildung 6.13 ist ein Schnitt durch das Voxelmodell zu sehen. In der Vergrößerung sind leichte Schatten des Übergangsbereichs im Zylinderinneren zu sehen, welche zwar keinen großen Fehler in der Oberflächenberechnung hervorrufen, jedoch durchaus in kleinem Maß Einfluss nehmen können. Dies betrifft vor allem die globale Schwellwertnutzung des klassischen Marching Cubes Verfahrens.

Im Folgenden werden die hochgenauen Tasterdaten als Referenzwerte herangezogen und die darin ermittelten geometrischen Parameter als Sollwerte angenommen. Zunächst stehen die beiden zu betrachtenden Zylinderradien im Vordergrund. In den Tabellen 6.12 und 6.13 sind erneut die Ergebnisse des Marching Cubes, sowohl in roher als auch in gefilterter Form aufgeführt. Es wird deutlich, dass die Verwendung des

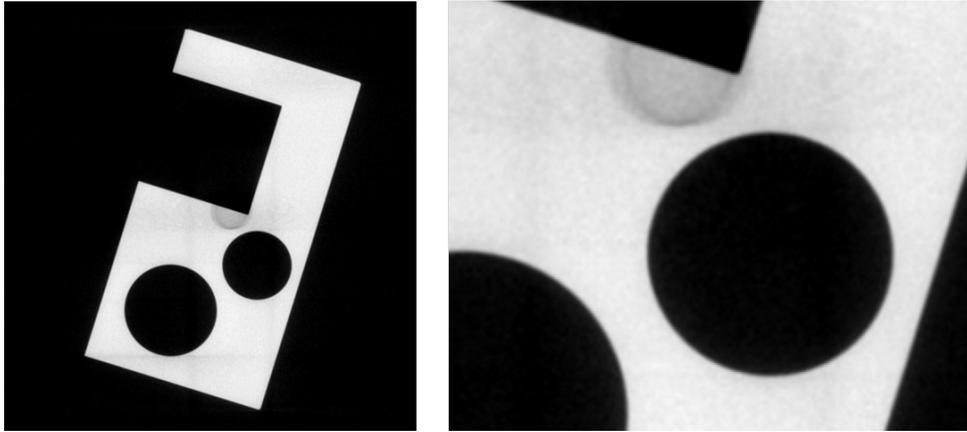


Abbildung 6.13: Schnittbild durch das Voxelmodell des Aluminiumbauteils (links) und vergrößerter Ausschnitt der Übergangsbereiche im Inneren (rechts)

klassischen Verfahrens bei einem derartigen Datensatz durch einen lokalen, filternden Verarbeitungsschritt deutlich verbessert wird. Betrachtet man die Ergebnisse der aufgabenbasierten Methode, so erreichen diese direkt eine geringere Abweichung zum Sollwert und liegen unter Annahme des  $MPE_{PS}$  für die Stufe 100L innerhalb der Toleranzen, selbst verglichen mit gefilterten Daten ( $24 \mu m$ ). Am besten schneidet hier, ähnlich zu den vorherigen Versuchen, die schwellwertbasierte Energie  $E_{Thresh}$  mit minimaler Gradientensuche im Subvoxelbereich ab. Zur Orientierung ist ebenfalls der jeweilige Radius angegeben, der im konstruierten Modell vorlag und somit als Initialwert diente.

D	Zylinderfit			
	KZ	Sollradius	Radius	RMS
Modell	-	7,5190	-	-
MC	7,5165	7,5010	0,010	-0,0155
MC gef.	7,5165	7,5126	0,006	-0,0039
V1 ii	7,5165	7,5155	0,010	-0,0010
V2 ii	7,5165	7,5114	0,011	-0,0051
V3 ii	7,5165	7,5108	0,012	-0,0057

Tabelle 6.12: Datenauswertung des kleinen Zylinders des Aluminiumbauteils, alle Angaben in  $mm$

Für die beiden festgelegten Ebenen wird die Distanz bestimmt und mit den Referenzdaten der Tasterpunktswolke verglichen. Zusätzlich wird der zuvor bestimmte  $MPE_{E_3}$  angelegt. Dieser Wert dient normalerweise als Toleranzangabe für bereits gefilterte Daten. Hier fällt das Ergebnis ähnlich wie bei den Zylindern aus, siehe Tabelle 6.14. Der alleinige Marching Cubes Algorithmus führt lediglich mit Nachbearbeitungsschritt zu entsprechend nahen Abstandswerten, während die energiebasierte Oberflächenbestimmung für  $E_{Thresh}$  und  $E_{Grad}$  direkt innerhalb der Toleranz und auch  $E_{Mat}$  deutlich näher an dieser Forderung liegt. Auch hier ist zusätzlich der

D	Zylinderfit				
	KZ	Sollradius	Radius	RMS	PS
Modell	-	10,0180	-	-	-
MC	10,0168	10,0058	0,009	-0,0110	
MC gef.	10,0168	10,0185	0,007	0,0017	
V1 ii	10,0168	10,0132	0,011	-0,0036	
V2 ii	10,0168	10,0096	0,011	-0,0072	
V3 ii	10,0168	10,0086	0,012	-0,0082	

Tabelle 6.13: Datenauswertung des großen Zylinders des Aluminiumbauteils, alle Angaben in *mm*

berechnete Abstand dieser Ebenen aus dem CAD-Modell angegeben. In Abbildung 6.14 sind jeweils die beiden Zylinder und die beiden Ebenen als Abweichungsdarstellung zu ihren eingepassten Elementen zu sehen.

D	Ebenendistanzen			
	Dist. Taster Soll	$MPE_{E_3}$	Dist.	$E_3$
Modell	-	-	10,056	-
MC	10,038	0,00463	10,068	0,030
MC gef.	10,038	0,00463	10,034	-0,004
V1 ii	10,038	0,00463	10,042	0,004
V2 ii	10,038	0,00463	10,045	0,007
V3 ii	10,038	0,00463	10,042	0,004

Tabelle 6.14: Datenauswertung der Distanz der ermittelten Ebenen, alle Angaben in *mm*

Während die gesuchten Elemente bei der aufgabenangepasstem Methode direkt mit den unterschiedlichen Triangulationen vorliegen, erfolgt für die Auswertung des Marching Cubes Datensatzes jeweils ein halbautomatisierter Einpassungsschritt für jedes regelgeometrische Element, siehe Abbildung 6.15, welcher einigen Aufwand zur optimalen Toleranzfindung und Parametrierung bedarf.

### 6.3 Typische Aufgabenstellungen und Beispielabläufe

Bei dem hier entwickelten Verfahren handelt es sich um ein aufgabenorientiertes Vorgehen, das den Nutzer in die Lage versetzt, die Oberflächenerzeugung aus CT-Daten angepasst an seine Problemstellung vorab zu kontrollieren. Die entscheidenden Vorteile des Verfahrens sind in der praktischen Anwendung zu finden. So ermöglicht der neue Ansatz die einfache Umsetzung von Mess- und Prüfaufgaben, die mit dem heutigen Standard deutlich mehr Arbeitsschritte benötigen oder gar nicht erst umsetzbar sind. Bereits in den Versuchen zur Genauigkeitsevaluation zeigten sich die

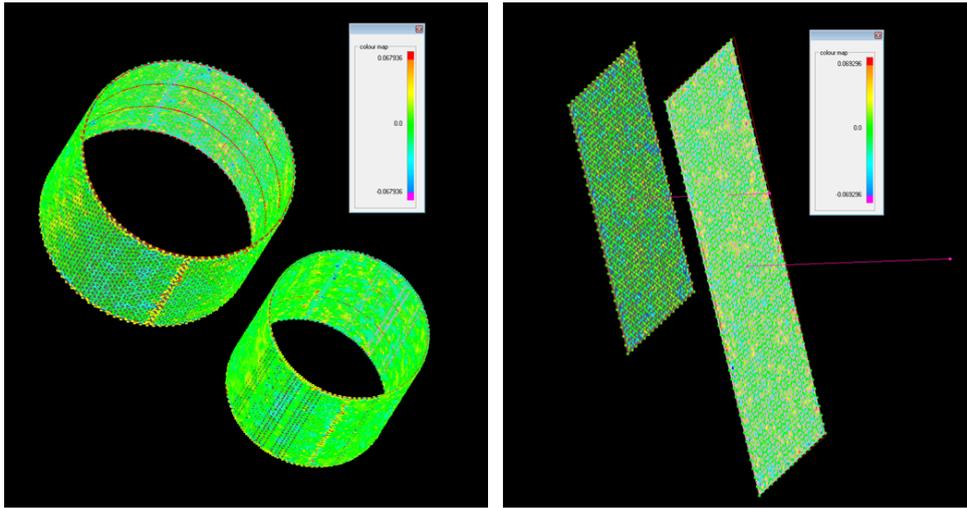


Abbildung 6.14: Abweichungsdarstellung beider Zylinder zum eingepassten Element für  $E_{Thresh}$  (links) und der Ebenen für  $E_{Grad}$  (rechts)

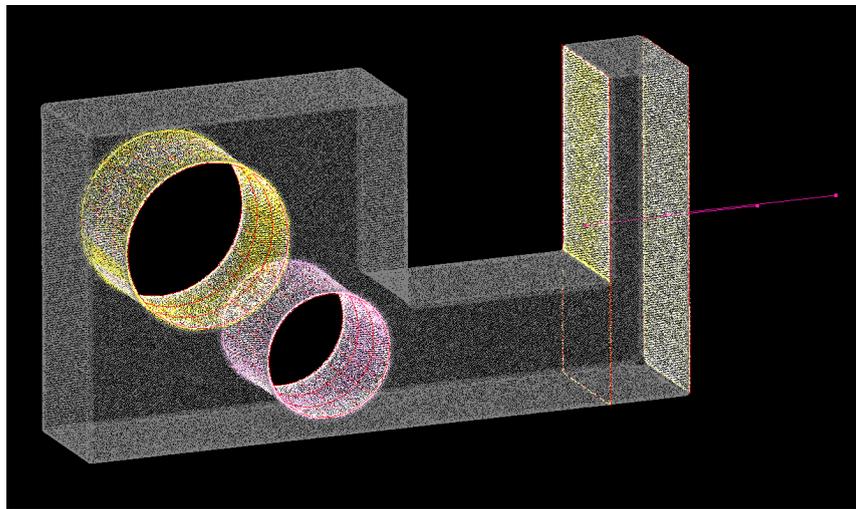


Abbildung 6.15: Reduzierte Punktwolke des MC Ergebnisnetztes mit eingepassten Regelgeometrien

Vorteile des neuen Vorgehens im Prozessablauf. So ist es möglich, verschiedene Materialien bei der Glaskugel zu separieren (C) und im Fall des Aluminiumbauteils werden direkt die relevanten Bereiche teilweise mit unterschiedlicher Triangulierung als Oberfläche generiert.

In den folgenden Unterabschnitten sind praktische Beispiele, welche repräsentativ für eine Vielzahl alltäglicher CT-Aufgaben stehen, ausgewählt und bezüglich des Arbeitsablaufs oder der Umsetzbarkeit im Vergleich zum Marching Cubes Verfahren dargestellt. Dabei handelt es sich um Beispiele aus den beiden größten Anwendungsgebieten, nämlich die Segmentierung bezüglich Form oder Material und der Bereichsextraktion spezieller ROI. Darüber hinaus werden die generellen Vorteile wie die Flexibilität bezüglich der Punktedichte, der Steuerung der lokalen Glattheit

oder das automatische Ignorieren entfernter Fragmente und Artefakte an geeigneter Stelle erläutert.

### 6.3.1 Materialbasierte Segmentierung

Eine Segmentierung bezüglich des Materials bedeutet in der Umsetzung die Trennung verschiedener Grauwertbereiche. Dies ist nur möglich, wenn alle relevanten Bereiche mit ausreichendem Kontrast im CT-Volumenmodell repräsentiert sind. Dies ist beispielsweise bei der Multimaterial-Kugel aus 6.2.3 der Fall, welche hier bereits ein passendes Beispiel darstellt. Ebenso trifft dies häufig auf verschiedene Kunststoffe zu. Deshalb kommt hier als geeignetes Anwendungsbeispiel der bereits bekannte Multimaterial-Zylinder, zusammengesetzt aus zwei verschiedenen Kunststoffen, erneut zum Einsatz. Dieses Objekt wurde in zwei Teilen mit unterschiedlichen generativen Fertigungstechnologien hergestellt und anschließend zusammen gesteckt. Bei dem äußeren Material handelt es sich um ein gesintertes Polyamidpulver (Polymer PA 12), welches eine geringere Dichte aufweist als das innere, Polypropylen-ähnliches Material, hergestellt mit dem patentierten PolyJet-Technologie der Fa. Stratasys [Str]. Nachdem beide Teile fest ineinander geschoben wurden, ist die Qualität der Berührungsfläche von Interesse, d.h. die zylindrische Form. Eine Datenmenge im Bereich von wenigen MByte ist für diese und weiterführende Untersuchung ausreichend.

Es ist also notwendig, sowohl die innere als auch die äußere Berührungsfläche zu bestimmen, um deren Übereinstimmung ermitteln zu können. Dazu erfolgt eine separate Oberflächenerzeugung mittels der Grauwertenergie  $E_{Mat}$  für jeweils beide Seiten mit demselben initialen Dreiecksnetz. Dieses Vorgehen war bereits in Abbildung 5.8 zu sehen. Betrachtet man die alleinige Extraktion der Innenfläche, lässt sich ein Vergleich der Abläufe zwischen dem vorgestellten und dem heute üblichen Vorgehen ziehen. Die Abbildung 6.16 zeigt im oberen Bereich die theoretisch notwendigen Schritte mit Schwellwertverfahren. Demnach muss zunächst ein geeigneter globaler Schwellwert für den Marching Cubes Algorithmus feststehen und damit die Oberfläche erzeugt werden. Diese beinhaltet jedoch nicht-relevante Bereiche, welche entweder manuell beschnitten oder falls möglich mittels eines Geometrieinpassungsschritts segmentiert werden müssen. Außerdem ist eine Datenreduktion notwendig, damit das resultierende Netz den Anforderungen für die Weiterverarbeitung entspricht. Bei der aufgabenbasierten Oberflächenbestimmung sind dagegen vorab lediglich die gesuchten Patches im CAD-Modell anzuwählen, sowie eine Angabe der maximalen Kantenlänge der Triangulierung und  $E_{Mat(side)}$  mit Angabe der Seite auszuwählen.

Nicht nur die Reduktion der Arbeitsschritte, sondern auch die Qualität der Ergebnisse ist hier zu erwähnen. Theoretisch lässt sich ein Schwellwert finden, der den inneren

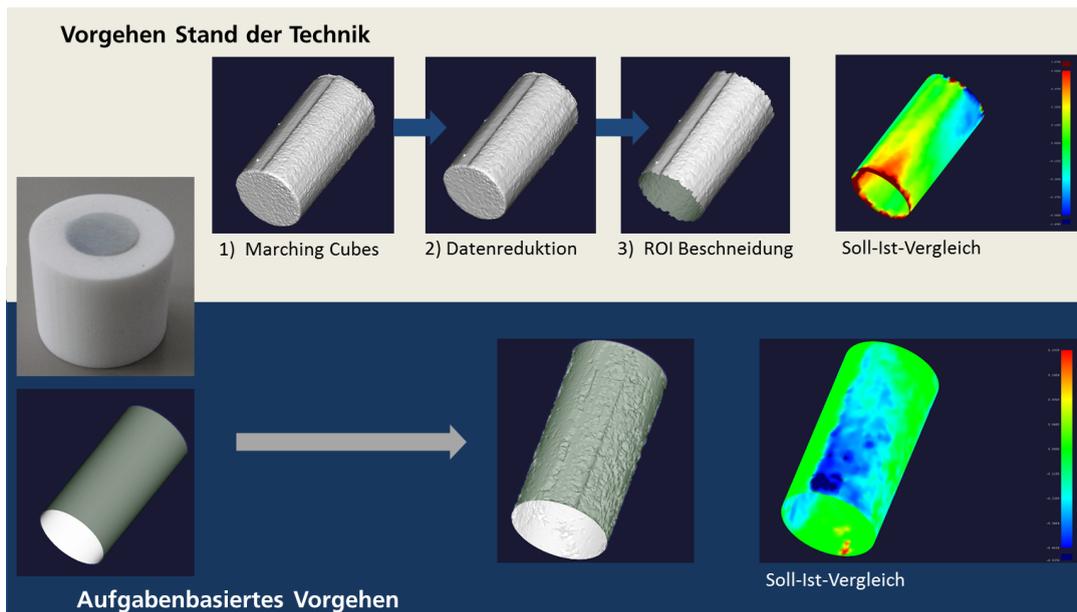


Abbildung 6.16: Vergleich der Abläufe für die Bestimmung der inneren Berührungsfläche des Multimaterial-Zylinders

Bereich extrahiert, da dieser höhere also hellere Grauwerte aufweist, jedoch ist die Eignung unklar. Wie bei der Multimaterial-Kugel (in Abbildung 6.12) bereits gezeigt wurde, ist die Wahl eines derart großen globalen Schwellwerts üblicherweise ungeeignet und führt bei unterschiedlichen Transitionen zu stark variierenden Grenzen. Dieser Effekt ist in diesem Beispiel im Bereich der Deckel des Zylinders zu beobachten. Dadurch und zusätzlich durch das manuelle Beschneiden sind die oberen und unteren Zylinderbereiche beim herkömmlichen Vorgehen stark beschädigt. Dies stellt sich durch die großen Abweichungen im Soll-Ist-Vergleich dar, während die Ränder im Vergleich zum neuen Ansatz ohne derartige Beeinträchtigungen wiedergegeben werden.

Neben den genannten Nachteilen des Standardvorgehens kommt als wichtigster Aspekt hinzu, dass es nicht möglich ist, die Aufgabe vollständig zu lösen. Die Wahl eines höheren globalen Schwellwerts erlaubt zwar die Abbildung des dichteren Materials, jedoch ist dies für das zweite äußere Material nicht möglich, da stets alle Grauwerte über der Schwelle als zum Objekt zugehörig klassifiziert und nicht weiter unterschieden werden. Das bedeutet, die innere Fläche des äußeren Kunststoffes ist auf diese Weise nicht extrahierbar. Das neue Vorgehen ermöglicht solch eine Oberflächensuche. In Abbildung 6.17 sind beide Berührungsflächen vergleichend dargestellt. Die durchgängige Lücke zwischen beiden Kunststoffen ist anhand der 3D-Abweichungsdarstellung gut sichtbar und zeigt, dass hier keine Abgeschlossenheit vorliegt.

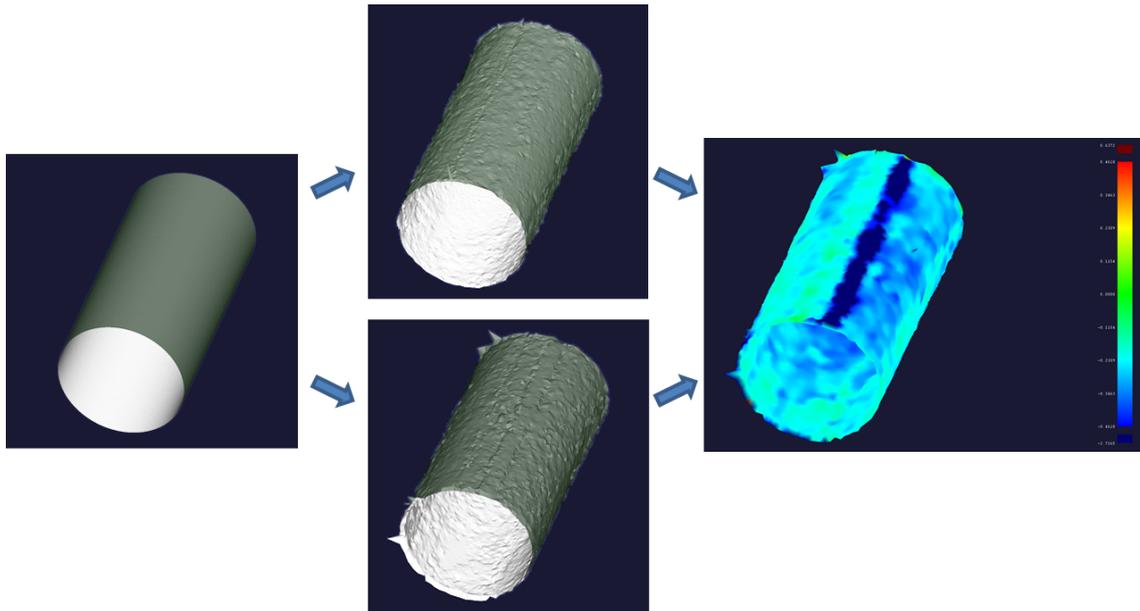


Abbildung 6.17: Vergleich der Berührungsfläche: Ausgehend vom initialen Modell (links) werden die innere (Mitte oben) und die äußere Fläche (Mitte unten) erzeugt und qualitativ auf auffällige Abweichungen untersucht (rechts).

Es ist zu beachten, dass hier vorwiegend die grauwertbasierte Energie in der Bestimmung berücksichtigt wird, da die glättende Wirkung der Krümmungsenergie das Ergebnis nicht zu stark beeinflussen sollte. Trotzdem ist sie aber durch den schwachen Kontrastübergang ebenso notwendig, um ausreichend stetige Oberflächennetze zu erhalten. Die Ausreißer an den Rändern kommen von Strahlungsaufhärtungsartefakten in der CT-Aufnahme, stören jedoch diese qualitative Auswertung nicht.

Mit dieser Methode ist die vollständige Trennung der Materialien umsetzbar. Da sie kaum von verschiedenen Grauwerttransitionen beeinflusst wird, entstehen sowohl für den dichten inneren als auch für den äußeren hohlen Zylinder korrekte Oberflächenmodelle, die gemeinsam oder separat betrachtet und weiter verarbeitet werden können, siehe Abbildung 6.18.

### 6.3.2 Geometriebasierte Segmentierung

In vielen Aufgabenstellungen steht nicht das Material oder die Separierung bestimmter Materialbereiche im Vordergrund, sondern die geometrische Auswertung. Es sind also bestimmte Formen oder Geometrien gesucht, welche für die Verwendung eines Bauteils Relevanz besitzen. Der in 6.19 abgebildete Kunststoffstecker der Firma TE Connectivity Ltd. besteht nur aus einem Material, besitzt aber einen relativ komplexen Aufbau mit vielen innenliegenden Flächen. Eine Aufgabe besteht darin, alle zylindrischen Formen auf Verzug zu untersuchen, damit das Passen zum Gegenstück gewährleistet ist. Dazu werden alle im CAD-Modell vorkommenden Zylinder als Ausgangspunkt gewählt und als Initialoberflächen bestimmt. Diese werden mittels

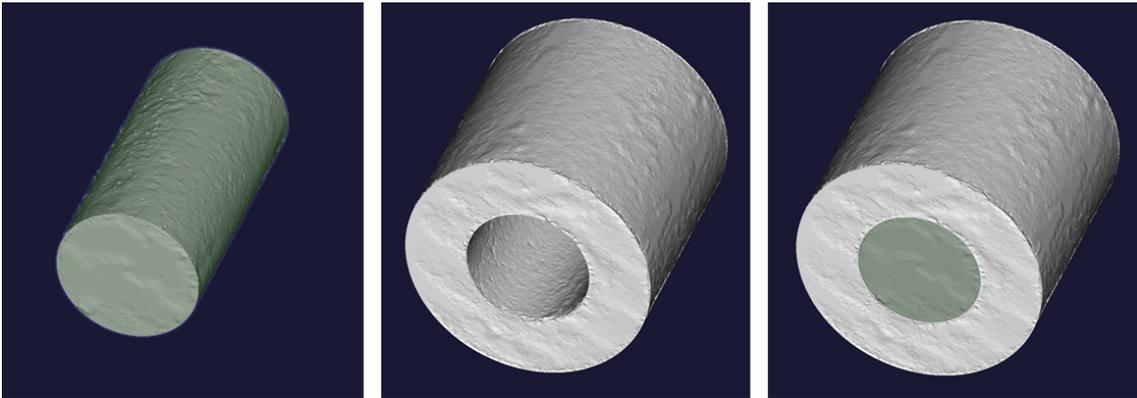


Abbildung 6.18: Ergebnisoberflächen für die beiden unterschiedlichen Materialien des Zylinderbauteils, separat und zusammengesetzt

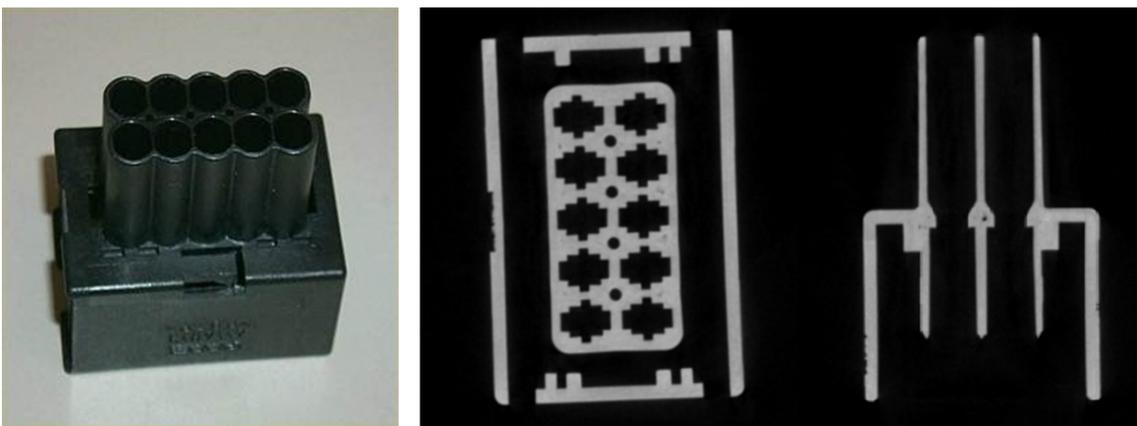


Abbildung 6.19: Foto eines Kunststoffsteckers (links) und Schnitte durch das dazugehörige Voxelmodell (rechts)

$E_{Grad}$  und einer zylindrischen Krümmungsbedingung minimiert. In Abbildung 6.20 sind die Ergebnisse der Oberflächen sowie deren Abweichungen zum Sollmodell zu sehen. Hier ist zu beachten, dass es sich um eine dünnwandige Stelle des Bauteils handelt, das Grauwertprofil also maximal die halbe Wandstärke umfassen sollte. Der Soll-Ist-Vergleich zeigt leichte Abweichungen an den Randbereichen, welche jedoch im tolerierten Rahmen liegen.

Als zweite Aufgabe sind innenliegende Flächen gesucht, die zur Beurteilung der inneren Formqualität des Kunststoffbauteils herangezogen werden sollen. Betrachtet man die Isofläche der Marching Cubes Oberfläche in 6.21, so wird deutlich, dass diese ausgehend von der Gesamtoberfläche nur schwer segmentierbar sind. Ohne Zuhilfenahme des CAD-Modells, geeigneter 3D-Auswertesoftware und ausreichend Erfahrung ist es einem Nutzer nicht möglich, eine solche Innengeometrie zu segmentieren.

Beim aufgabenbasierten Vorgehen ist diese Oberflächenbestimmung mit direkter Geometrieauswertung nach demselben Schema realisierbar wie zuvor bei den Zy-

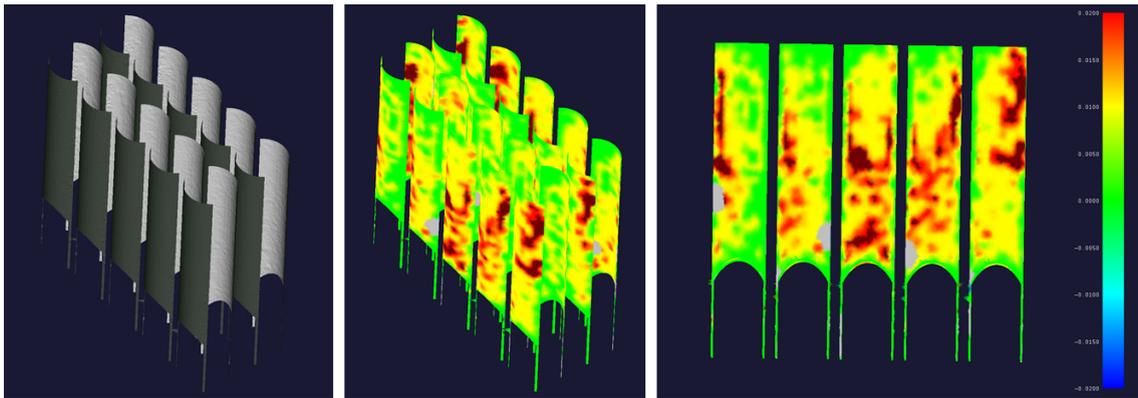


Abbildung 6.20: Zylindrische Innenflächen des Kunststoffsteckers mit Abweichungsdarstellung zur Sollform

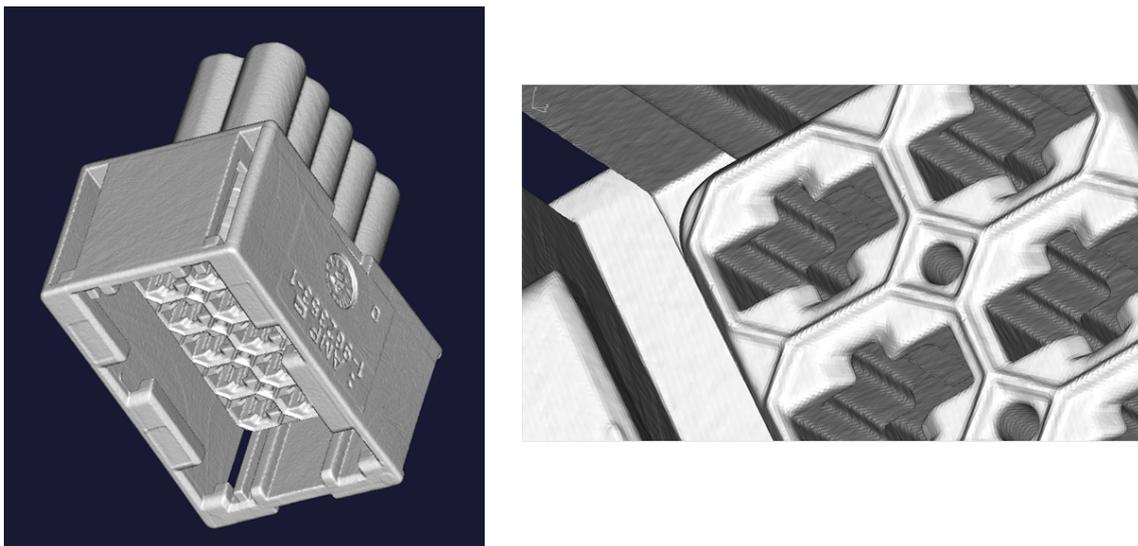


Abbildung 6.21: STL-Daten des Kunststoffsteckers aus MC Verfahren und Vergrößerung mit Blick ins Innere

lindern. In Abbildung 6.22 ist anhand einer Auswahl an Innenflächen gut erkennbar, dass kein systematischer Verzug im Inneren vorliegt und das Bauteil als ausreichend gut beurteilt werden kann.

Beide Untersuchungen müssen nicht nacheinander erfolgen, sondern können genauso gleichzeitig durchgeführt werden. Dazu werden alle relevanten Bereiche mit den dazugehörigen Werten für die Punktedichte trianguliert und jeder Punkt bzw. jede Punktgruppe mit seinen Angaben bezüglich der zu verwendenden Energiefunktionen und Gewichten versehen. Die Minimierung kann im Folgenden gemeinsam ablaufen. Im Gegensatz dazu kann beim Marching Cubes Ergebnis nur eine nachträgliche sequentielle Abarbeitung vor allen in Bezug auf unterschiedliche Datenreduktion durchgeführt werden. In Abbildung 6.23 ist das vollständige Marching Cubes Ergebnis den für beide Aufgaben ROI-extrahierten Daten gegenübergestellt.

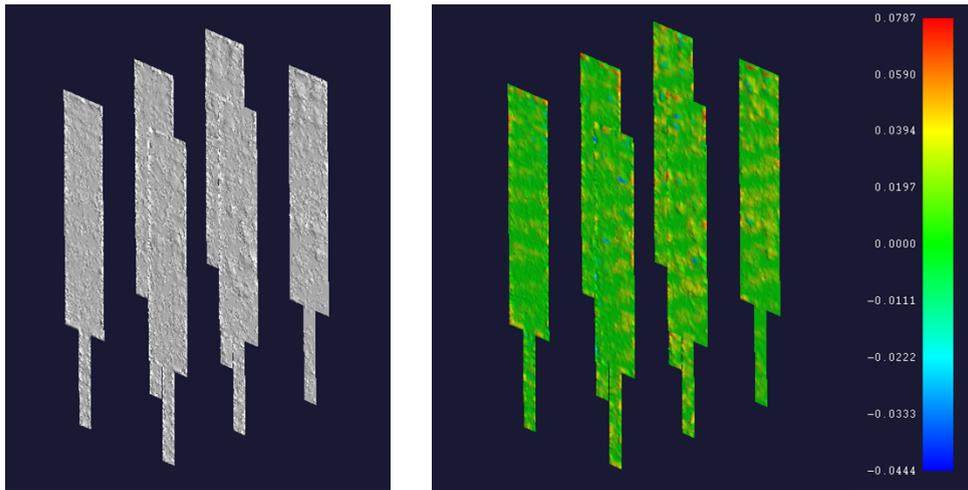


Abbildung 6.22: Ebene Innenflächen des Kunststoffsteckers mit Abweichungsdarstellung zur Sollform

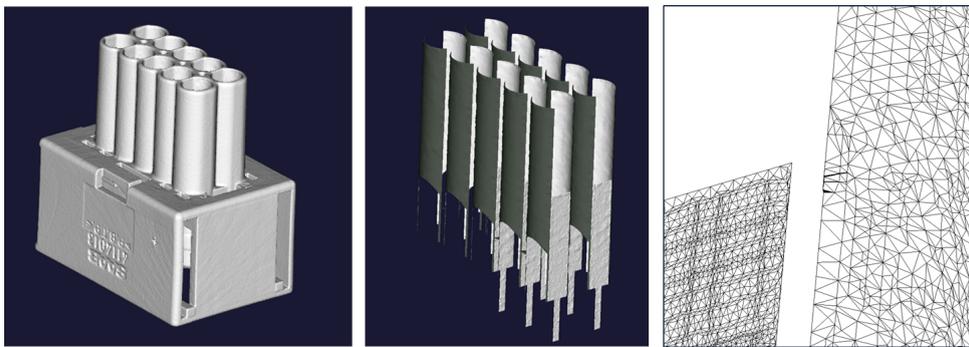


Abbildung 6.23: Die STL-Daten des Marching Cubes (links), das Ergebnis der aufgabenbasierten Oberflächenbestimmung für beide Aufgabenstellungen (Mitte) und die unterschiedliche Triangulierung der Bereiche vergrößert (rechts)

Darüber hinaus verlangen die an das Bauteil gestellten Prüfaufgaben lediglich die Erkennung eines prinzipiellen Verzugs. Da es sich um ein Bauteil mit vielen Strukturen und damit viel Oberfläche handelt, erzeugt der Marching Cubes einen STL-Datensatz mit über 200 MByte Datenmenge. Durch die Wahl einer geringen Punktdichte werden die in 6.23 (rechts) dargestellten Bereiche mit 9 MByte beschrieben, was für die gegebene Problemstellung ausreichend ist. Dies unterstreicht den pragmatischen Aspekt des vorgestellten Ansatzes für die industrielle Anwendung. Zusätzlich zur Einsparung von Verarbeitungsschritten werden keine unnötigen Datenmengen erzeugt.

Das Beispiel des Kunststoffsteckers veranschaulicht schließlich noch einen weiteren Vorteil des neuen Vorgehens. In der CT-Aufnahme wird deutlich, dass sich im Inneren des Materials Lufteinschlüsse befinden (siehe 6.19), was bei derartigen Kunststoffspritzgussbauteilen häufig der Fall ist. Dies ist dem Hersteller bekannt und für die Funktionalität des Bauteils unkritisch. Erreichen solche Lunker jedoch eine ge-

wisse Größe, sodass sie im Voxelmodell mit ausreichend Kontrast dargestellt werden, fallen sie bei der Verwendung eines globalen Vorgehens unter den Schwellwert und werden als Oberfläche identifiziert. Der klassische Marching Cubes Algorithmus erzeugt also innere Luftblasen mit. Und da diese vollständig im Inneren liegen, ist ein manuelles Entfernen sehr mühsam und nur mit professioneller Software zur Oberflächenbearbeitung machbar. Ein zusätzlicher Nachbearbeitungsschritt, der automatisch zusammenhängende Dreiecksnetze erkennt und in Abhängigkeit der Größe entfernen kann, ist hier notwendig. In Abbildung 6.24 sind einige Lunker im manuell aufgeschnittenen Marching Cubes Datensatz zu sehen.

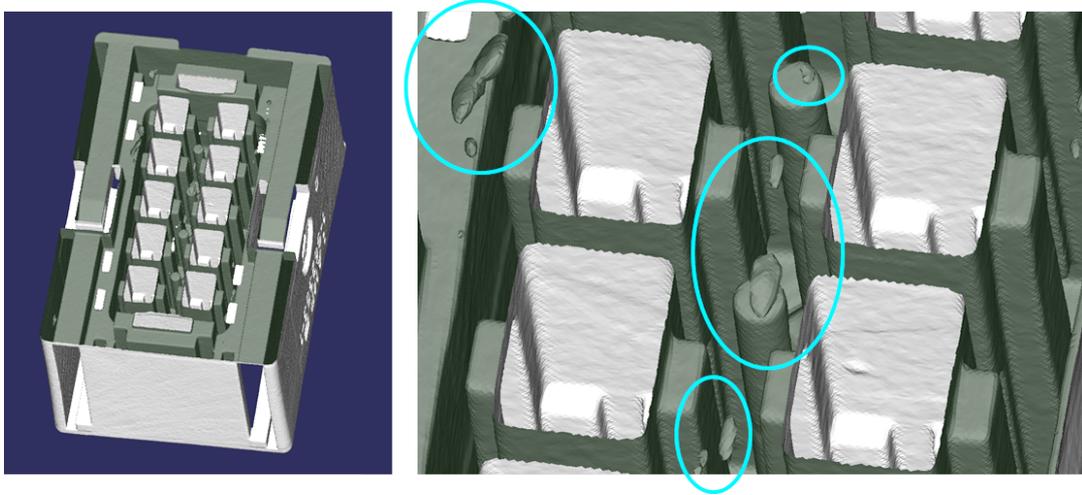


Abbildung 6.24: Aufgeschnittene STL-Daten aus MC Verfahren mit inneren Oberflächen durch Lunker im CT-Datensatz

Diese Oberflächen können bei messtechnischen Auswertungen durchaus störend sein, wenn sie beispielsweise bei einem Soll-Ist-Vergleich fälschlicherweise berücksichtigt werden. Darüber hinaus handelt es sich um zusätzliche Datenmengen, die keine Relevanz bei der Bauteildigitalisierung und -messung haben. Bei einigen Anwendungen kann dies eine wichtige Rolle spielen. So wird die CT häufig zur Oberflächendigitalisierung von Erstmustern und Modellen genutzt. Für diese werden neben den typischen Modelliermassen teilweise zusätzlich Füll- oder Stützmaterialien verwendet, die zu starker Lunkerbildung neigen, wie z.B. Schäume. Das Einbeziehen solcher entfernter Lufteinschlüsse oder sonstiger kleiner Fragmente, die nicht zur gesuchten Oberfläche gehören, kann bei dem aufgabenbasierten Verfahren nicht auftreten. Lediglich die Nähe zum Oberflächenmodell stellt eine Gefahr da, wenn der Einschluss im Grauwertprofil abgebildet ist. Da jedoch für die möglichen Formen der Grauwertverläufe klare Restriktionen festgelegt wurden, würden derartige Abweichungen zur Nichtberücksichtigung der betroffenen Punkte führen. Zudem kämen hier die Anforderungen an die Oberflächenkrümmungen und die dazugehörigen Energien zum tragen, da diese ein entsprechendes „Ausreißen“ verhindern würden.

### 6.3.3 Extraktion beliebiger Bereiche

Neben der material- oder geometrieabhängigen Bereichstrennung kann der Grund für die Extraktion bestimmter Teile auch in der Überprüfung der Funktionalität liegen. Dazu können beliebige Bereiche an einem Bauteil relevant sein, vor allem bezüglich Lage oder Form. Als Testobjekt dient hier ein Zwei-Finger-Kunststoff-Greifer der mittels 3D-Lasersinterverfahren, ähnlich zum Multimaterial-Zylinder, hergestellt wurde. Bei diesem Bauteil handelt es sich nicht um einen Prototypen, sondern um ein real eingesetztes Funktionsteil. Die Finger beruhen auf dem Aktuatorprinzip eines Luftbalges, d.h. in einem innenliegenden Faltenbalg wird ein Innendruck von ca. 2 Bar erzeugt. Dadurch weitet er sich auf und drückt die an Filmscharnieren gelagerten Greiferarme mittels der so entstehenden Hebelwirkung zusammen [Bar08]. Zur Überprüfung der korrekten Funktionalität soll der Greifer unter Dauerbelastung getestet werden, da die Vermutung besteht, dass sich der Kunststoff nicht unmittelbar vollständig in seine Ausgangsposition zurückstellt. Die Aufgabe besteht darin, eine mögliche Materialermüdung nachzuweisen und deren Verhalten nach Belastung und Entlastung systematisch zu erfassen. In Abbildung 6.25 ist der Greifer, sein Funktionsprinzip sowie ein Schnitt durch das Voxelmodell zu sehen. In der CT-Aufnahme sind im Inneren des Faltenbalgs Ablagerungen erkennbar. Dabei handelt es sich um Restpulver aus dem Herstellungsprozess, das sich nicht entfernen ließ.

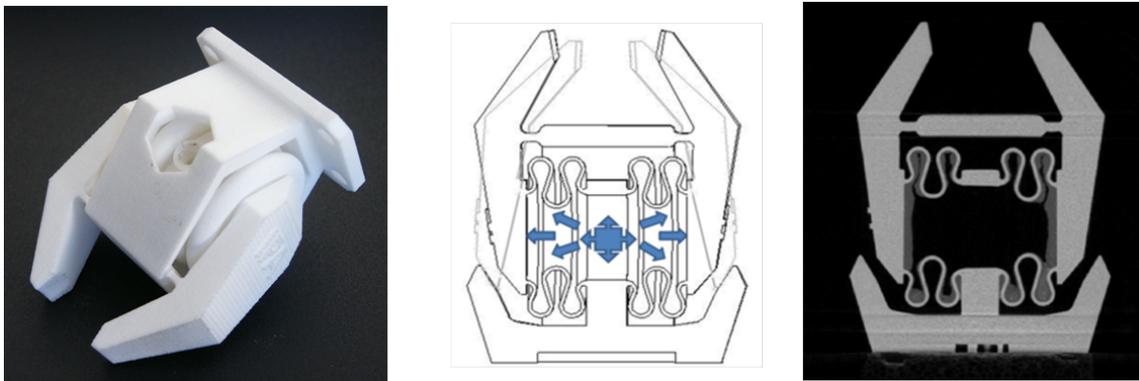


Abbildung 6.25: Foto des Zwei-Finger-Greifers (links), Funktionsprinzip Faltenbalg (Mitte) [Bar08] und Schnitt durch das Voxelmodell (rechts)

Dank der zerstörungsfreien Datenerfassung ermöglicht die CT die Untersuchung an demselben Bauteil in unterschiedlichen Zuständen. Der Greifer wurde vor und direkt nach einer 24-stündigen Dauerbeaufschlagung von Druck sowie nach weiteren 48 Stunden Entlastungsphase jeweils mittels CT aufgenommen. Da es sich um ein Objekt mit einer großen Oberfläche handelt und zusätzlich die Restmaterialien im Inneren zu Fragmenten führen, erhält man bei Anwendung globaler Schwellwertverfahren eine Datei mit über 450 MByte Daten. Diese können nun vollständig per

Soll-Ist- oder Ist-Ist-Vergleich miteinander verglichen oder beispielsweise als Ebenenprojektion überlagert werden, zu sehen in Abbildung 6.26.

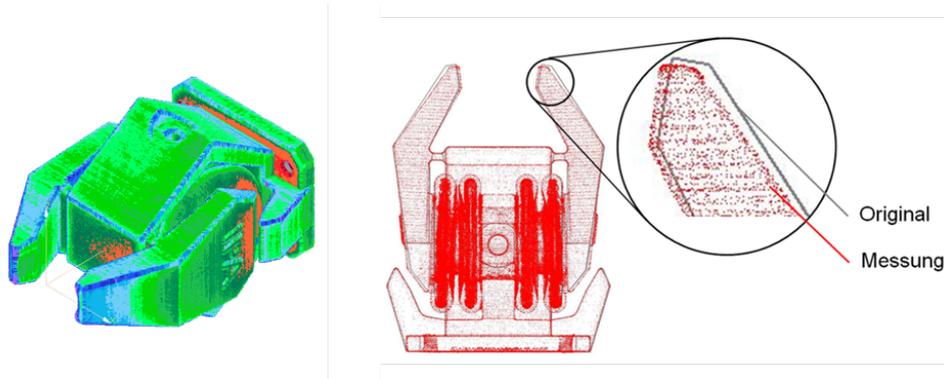


Abbildung 6.26: Vollständiger Soll-Ist-Vergleich der CAD- und MC-Daten (links) und überlagerte Ebenenprojektion des Greifers [Bar08](rechts)

Wie in dieser Standardauswertung zu erkennen ist, wirkt sich die Greiferbewegung am stärksten an den Fingerenden aus, weshalb eine Materialermüdung hier am deutlichsten auftritt. Zum Nachweis und zur weiteren FEM-Simulation der Bauteilreaktion auf Be- und Entlastung genügt die Abweichung der äußeren Greiferfläche. Für die Lösung der Aufgabe ist folglich die Auswertung genau dieser Bereiche mit einer für das im Nachgang genutzte Simulationsprogramm ausreichenden Punktdichte zu verfolgen.

Das Vorgehen für die Problemstellung mit der aufgabenoptimierten Oberflächenbestimmung ist in Abbildung 6.27 zu sehen. Ausgehend vom CAD-Modell werden die relevanten Bereiche ausgewählt, trianguliert und im Volumenmodell angepasst.

Bereits in der Überlagerung des initialen Modells der Greiferfingerflächen mit dem Voxelmodell wird der Verzug durch die Materialermüdung nach 24 Stunden Dauerbelastung deutlich. Jedoch ist nach einer Entlastungszeit von 48 Stunden eine Verringerung dieses Effekts an diesem Greifer und eine erneute Annäherung an die Ausgangsposition erkennbar.

Es lassen sich viele Beispiele dieser Art finden. Gerade für eine spätere FEM-Simulation mit den extrahierten Oberflächendaten ist eine sinnvolle Datenmenge aus den relevanten Bereichen wichtig. Aber auch viele Mess- und Prüfaufgaben benötigen spezielle Behandlung einiger Bereiche und sinnvolle Einschränkungen der Datenmengen für die optimale Weiterverarbeitung.

### 6.4 Bewertung und Interpretation der Ergebnisse

Die durchgeführten Versuche dienten zum einen dazu, die Qualität der Ergebnisse der aufgabenangepassten Oberflächenbestimmung zu bewerten und zum anderen deren optimale Verwendung zu evaluieren. Schließlich wurden die wichtigsten

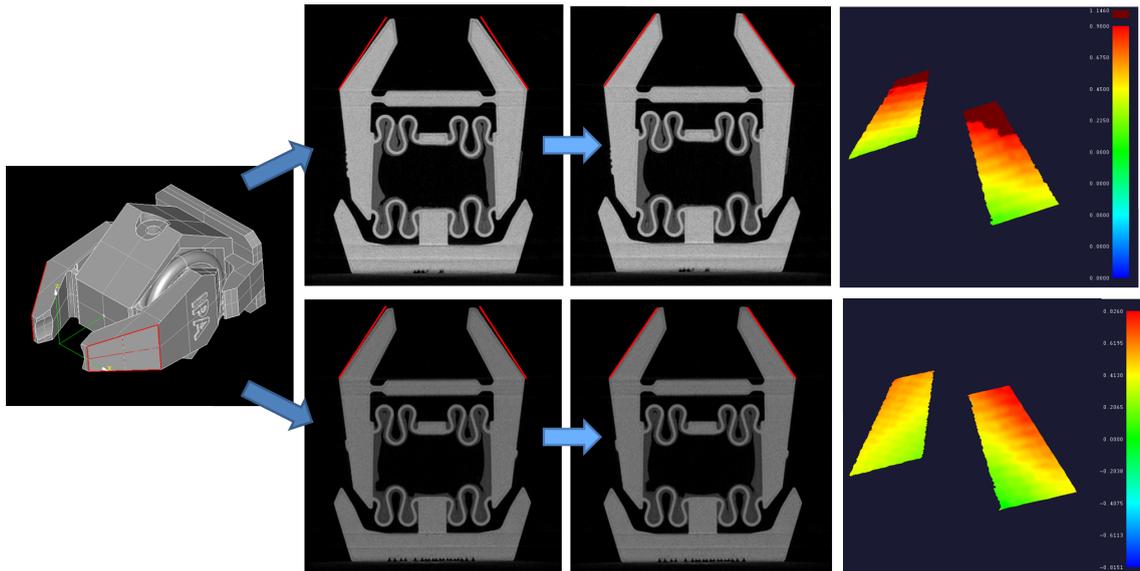


Abbildung 6.27: Schritte der Bestimmung der Fingerflächen des Greifers mit Auswertung als Soll-Ist-Vergleich für Greifer nach 24 Stunden Dauerbelastung (oben) und nach weiteren 48 Stunden Entlastung (unten)

Anwendungsgebiete und die entscheidenden Vorteile anhand praktischer Beispiele aufgezeigt.

Die Evaluation der Genauigkeit mittels optimaler und kalibrierter Referenzobjekte zeigt, dass das hier vorgestellte Verfahren bereits sehr gute Ergebnisse im Vergleich zum Marching Cubes Algorithmus liefert. Die Daten des klassischen Marching Cubes zeigten den Bedarf an Nachbearbeitung. Mit der hier genutzten Tiefpassfilterung erreichten seine Oberflächen sehr geringe Abweichungen bezüglich der betrachteten Kennwerte. Die Oberflächen der aufgabenoptimierten Methode liegen bei der Einhaltung der Maßtoleranz zumeist innerhalb der Forderungen für gefilterte Daten und das teilweise mit geringeren Abweichungen als bei diesen. Anders verhält es sich bei den Formabweichungen. Hier zeigt das Verfahren Schwächen. Eindeutige einzelne Ausreißer und der zusätzlich ermittelte mittlere Fehler (RMS) weisen darauf hin, dass das Verhalten des Verfahrens nicht derart schwerwiegend ist, wie die Werte befürchten lassen. Jedoch ist eine generell geringere Stetigkeit bzw. ein höheres Rauschen als bei der Nutzung eines globalen Schwellwerts und dem Marching Cubes Algorithmus zu beobachten. Das lässt sich durch eine geeignete Parametrierung und Nutzung der Krümmungsenergie verringern. Vergleicht man die verschiedenen getesteten Formen der Grauwertenergie, so führt auch hier die Verwendung eines Schwellwerts sowohl mit  $E_{Thresh}$  als auch mit dem Pseudo-MC Vorgehen zu den geringsten Formabweichungen. Begründet ist das durch den starken Kontrast bei einem Grauwertübergang von Objekt zu Luft bei nur einem vorkommenden Material in einer CT-Aufnahme.

Das Problem der Ausreißer und bereichsweiser Störungen der Oberfläche, welche zu den teilweise starken Formabweichungen führen, ist auf Probleme der Triangulierung zurückzuführen. Die verwendete Dreiecksnetzerzeugung aus CAD-Daten generiert häufig Dreiecke mit großen Winkeln und bzw. oder stark unterschiedlichem Flächeninhalt. Oft sind Dreiecke vollständig degeneriert. Vor allem an Rändern, Patchgrenzen und an Extremstellen tritt diese Problematik auf. Dies war zwar vorab bekannt und die Krümmungsberechnung wurde entsprechend gewählt, jedoch sind diese Effekte an einigen Stellen so stark, dass die diskrete Krümmung lokal fehlerhafte Werte annimmt. Die Nutzung von Zusatzbedingungen an die Krümmungsenergie, beispielsweise durch die Angabe von Sollkrümmungswerten, hilft, dieses Problem zu umgehen. Eine solche Bedingung wurde bei der Multimaterialkugel verwendet. Hier zeigt sich die Leistungsfähigkeit des neuen Ansatzes. Während sich globale Schwellen an dieser Stelle als unbrauchbar erweisen, liefert die Energieminimierung Kennwerte, die die Kalibrierkugel sehr gut wiedergeben. Bei der Auswertung des in mehrerer Hinsicht komplexeren Testteils aus Aluminium liegen die Ergebnisdaten erneut sehr nahe an und teilweise unter den Abweichungen des gefilterten Marching Cubes Algorithmus bezüglich Maß und Länge. Das spricht für die Praxistauglichkeit bei der Untersuchung realer Bauteile. Die unterschiedlichen dargestellten Anwendungsbeispiele unterstreichen dies und verdeutlichen zudem die praktischen Vorteile und erweiterten Möglichkeiten, die sich erst dank des neuen Vorgehens durchführen lassen.

Ein wichtiger Aspekt der Evaluation ist die Identifikation der optimalen Nutzung der unterschiedlichen Energieformen und Parametrierungen. Die Frage, welche Energie sich für welche Aufgabe am besten eignet, lässt sich anhand der gewonnenen Erfahrungen mit Tendenzen beantworten. Die Eignung hängt im Wesentlichen mit den vorkommenden Grauwertübergängen zusammen. Ist nur ein Materialübergang vorhanden, kommen alle genannten Formen von  $E_{Vox}$  in Frage. Die Versuche, bei denen zumeist ein starker Kontrast gegeben war, zeigten stets die besten Ergebnisse bei der Nutzung eines Schwellwerts. Ist also eine solche Grenze verfügbar empfiehlt sich seine Verwendung. Hier spielt nicht unbedingt die Stärke des Kontrasts die Hauptrolle, sondern die Gleichmäßigkeit des Übergangs. Eine derartige gleiche Unterteilung ist wiederum negativ für die Suche nach dem größten Gradienten, da dies leicht zu Sprüngen führt, die durch die Krümmungskomponenten oder durch die Subvoxelunterteilung ausgeglichen werden müssen. Sobald die Materialübergänge variieren, ist kein optimaler fester Schwellwert vorhanden und damit  $E_{Tresh}$  nicht mehr nutzbar. Dies betrifft sowohl Datensätze mit mehr als einem Material als auch solche mit unterschiedlichen Übergängen, z.B. durch Unterschiede in den Wandstärken oder Artefakte. Hierfür hat sich im allgemeinen Fall  $E_{Grad}$  als geeignet erwiesen. Außerdem liefert die Wahl einer Materialseite mit  $E_{Mat(Side)}$  zumeist ähnliche Ergebnisse

wie die Gradientensuche. Dafür ist jedoch die Eingabe eines zusätzlichen Parameters, der Seite, notwendig, weshalb  $E_{Grad}$  hier zu bevorzugen ist. Anders verhält es sich bei expliziten Problemstellungen der Materialtrennung, vor allem, wenn die Form der Grauwertprofile variieren kann. Für diese Aufgabenstellung ist die Angabe eines Materials bzw. hier der Seite des Grauwertprofils anzugeben, also  $E_{Mat(side)}$  zu verwenden. Als Krümmungsenergie wurde aufgrund der hohen Punktedichten vorwiegend  $E_{Flach}$  genutzt, also die Suche nach einer Position mit möglichst kleiner Krümmung, welche ihren Zweck wie erwartet erfüllt hat. Bei höherer Gewichtung trat ein glättender Effekt auf, der die Formabweichung und den mittleren Fehler reduzierte. Auch die Einführung von zusätzlichen Bedingungen in Form von Toleranzen für die Krümmung selbst konnte erfolgreich eingesetzt werden. Grundsätzlich zeigte die stärkere Nutzung der Krümmungsenergie auch eine größere Nähe zum Ausgangsmodell. Aus dem Grund ist sie mit Vorsicht und Blick auf die Grauwertdaten nur in Maßen einzusetzen.

Allgemein spielt die Wahl der Parameter eine wichtige Rolle. Hiermit sind vor allem die Gewichtungen gemeint, für welche bisher noch keine Automatisierung vorgeschlagen wurde. Für die Durchführung der Versuche wurde jedoch vorab die Annahme formuliert, dass eine stärkere Gewichtung der Grauwertenergie für die Voxelsuche und eine größere Bedeutung der Krümmungen für die Subvoxelsuche geeignet seien. Damit ist gegeben, dass der korrekte Voxel als Ausgangsbasis für eine lokale Glättung dient. Dies folgt einem ähnlichen Grundprinzip wie eine Vielzahl der vorgestellten und diskutierten Verfahren aus dem Stand der Technik. Die durchgeführten Versuche anhand der Kalibrierbauteile bestätigten diese Tendenz. Diese Gewichtungsform lieferte stets bessere Ergebnisse als die gleichwertige Gewichtung in allen Ablaufschritten. Außerdem führte die sehr starke Gewichtung der Krümmung für die Subvoxelsuche zwar oft zu leichten Verbesserungen, jedoch scheint diese zu schwach um das Risiko der Nichtbeachtung lokaler Grauwerte in Kauf zu nehmen. Aus diesem Grund folgt für die Datensätze der Kalibrierobjekte, dass ein ungefähres Verhältnis von 4 : 1 (Grauwert:Krümmung) und umgekehrt als geeignet für die Wahl der Gewichtungen der Teilenergien beurteilt wird. Bei den realen Anwendungsbeispielen verhält es sich ein wenig anders. Wie bereits erwähnt, kann es bei unterschiedlichen, verschwommenen oder kontrastarmen Übergängen bei der Nutzung der Gradientenminimierung zu Sprüngen kommen. Um das zu verhindern, sollte die Krümmungsenergie mehr Gewicht erhalten, sodass die Subvoxelsuche im richtigen Bereich stattfinden kann. Hier ist die Angabe eines Verhältnisses schwierig, da es stark von der Aufgabe und den gegebenen Daten abhängt. Hier war die Wahl von 2 : 1 für die Voxelbestimmung und 1 : 3 für die Subvoxelsuche in den durchgeführten Untersuchungen stets zielführend. Zu beachten ist natürlich auch die Aufgabenstellung. Bezieht sich diese direkt auf die Materialien, wie bei 6.3.1,

so darf sie selbstverständlich nicht zu gering gewichtet sein, da sonst eine Lösung verhindert wird. Alle weiteren Parameter wurden wie in Kapitel 5 vorgeschlagen automatisch gesetzt und erwiesen sich als geeignet. Eine Ausnahme war die Größe des Grauwertprofils, welche für die dünnwandigen Zylinder des Kunststoffsteckers manuell in Abhängigkeit der Materialstärke angepasst werden musste.

Die Wahl der Parameter sowie die Initialisierung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Oberfläche. Die Varianz der Ergebnisse steht folglich in Zusammenhang mit den Eingabewerten und dem Ausgangsnetz. Die Positionen der einzelnen Punkte können sich im Rahmen der erlaubten Schritte, also in Abhängigkeit der Grauwertprofilgröße entlang der Normalenrichtung, bewegen. Mit der Varianz sowie mit der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verhält es sich ähnlich wie beim Marching Cubes Algorithmus. Bei gleichem globalen Schwellwert werden hier gleiche Oberflächen erzeugt. Zur Gewährleistung der konstanten Ergebnisqualität wird der Schwellwert mit automatischen Verfahren rückführbar auf Basis feststehender Daten, den Voxel-daten, berechnet. Ebenso muss bei den Parametern der aufgabenbasierten Oberflächenbestimmung vorgegangen werden. Das bedeutet, alle Eingabewerte, die nicht Bestandteil der Aufgabenformulierung sind, sollten sich automatisch aus konstanten Daten und Informationen berechnen, sowohl um Reproduzierbarkeit zu garantieren, als auch um die Varianz der Ergebnisse zu minimieren. Dies ist zu großen Teilen in der vorliegenden Entwicklung bereits geschehen, jedoch besteht in einigen Fällen noch der Bedarf an ausführlicher Evaluation der gewählten Automatisierung. Außerdem ist hier eine Unterscheidung der Aufgabenart und -anforderungen notwendig, da beispielsweise verschiedene Punktedichten oder Energieformen die absolute Varianz beeinflussen können. Auch hierzu ist noch eine umfassende Studie mit einem großen Aufgabenspektrum durchzuführen.

Zuletzt soll noch angemerkt werden, dass eine Auswertung bezüglich der Laufzeit bewusst nicht durchgeführt wurde, da keine Vergleichbarkeit zwischen den verwendeten Implementierungen, hauptsächlich bezüglich Parallelisierung und Arbeitsspeichernutzung (64-Bit), vorlag. Zu bemerken ist abschließend, dass hier großes Optimierungspotential gegeben ist, da die vorliegende Greedy-Implementierung eine parallele Abarbeitung der Energieminierung ermöglicht. Ebenso ist eine 64-Bit-Portierung und die damit einhergehende Arbeitsspeichervergrößerung umsetzbar. Das neue Vorgehen vereint eine Vielzahl an Arbeitsschritten in sich, sodass auch mehr Daten verarbeitet und berechnet werden müssen. Dafür sinkt der Bedarf an zusätzlicher Software mit langen Ladezeiten und wechselnden Schnittstellen und den damit verknüpften Datenformaten, was eine große Zeitersparnis darstellt, die bei einem Laufzeitvergleich zu berücksichtigen wäre.

## 6.5 Zusammenfassung der Bewertung und Fazit

Zusammenfassend ist die Auswertung des neuen Vorgehens sehr zufriedenstellend. Mit Ausnahme der Ergebniswerte der Formtoleranzen, welche auf einzelne topologische Probleme zurückzuführen sind, erreichen die ermittelten Kennwerte eine sehr gute Qualität, sodass von der prinzipiellen Eignung des Verfahrens ausgegangen werden kann. Die Hauptvorteile gegenüber dem Stand der Technik liegen in der Lösung vielfältiger praktischer Aufgaben, die nach bisherigen Standards nicht oder nur mit einer Vielzahl aufwändiger Nachbearbeitungsschritte durchführbar wäre. Außerdem bietet der direkte Einfluss der Anforderungen bezüglich der gewünschten Netzform einen neuartigen Nutzerkomfort und spart wiederum zusätzliche Datenbearbeitung. Hier zeigt sich das wesentliche Leistungspotential der aufgabenangepassten Oberflächenbestimmung aus CT-Daten.

Als Fazit lässt sich sagen, dass der Marching Cubes Algorithmus ein ausgereiftes Verfahren ist, das zuverlässig gute Oberflächen aus Volumendaten mit gutem Kontrast mit der optimal an die Voxelaufösung angepassten Punktdichte erzeugt. Sind derartige Aufgabenstellungen und entsprechende Daten gegeben, ist er alleinstehend oder kombiniert mit einem Filterungsschritt eine gute Wahl. Liegen jedoch dazu abweichende Anforderungen beispielsweise durch die spätere Auswertung oder aufgrund des Bauteils und der dazugehörigen CT-Daten vor, so bietet das neue Vorgehen eine gute Alternative zur optimalen Durchführung der speziellen Aufgabenstellung.



---

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die industrielle Computertomographie findet zunehmend Anwendung bei messtechnischen und weiterführenden Auswertungen. Die Aufgabenstellungen werden hierbei immer vielfältiger und komplexer, sodass neue Strategien der 3D-Datenverarbeitung notwendig sind um dieser Herausforderung entgegen zu treten und neuen Anforderungen gerecht zu werden. Ein Schlüssel ist hierbei die adäquate Extraktion von Oberflächen aus den Volumendaten der CT. Diese liefern die notwendigen Informationen über die Materialgrenzen eines Bauteils. Für die messtechnischen Fragestellungen nach Maßen, Einhaltung von Toleranzen oder auch für die Weitergabe zu einer CAD-Bearbeitungs- oder Simulationssoftware sind diese essentiell.

In der durchgeführten Arbeit wurde zunächst die CT-Technologie mit ihren Stärken und Schwächen beleuchtet sowie das Spektrum an Aufgabenstellungen und Anwendungsgebieten vorgestellt. Anschließend erfolgte die Darstellung allgemeiner Ansätze zur Segmentierung von Bereichen bzw. der Ermittlung von Grenzen aus der klassischen Bildverarbeitung. Außerdem wurde der Stand der Technik der Oberflächenextraktion mit den Mankos bezüglich einiger der gegebenen Problemstellungen aufgezeigt. Der Schwerpunkt lag hierbei auf dem Marching Cubes Algorithmus, da dieser heutzutage, zumeist in angepasster und erweiterter Form, den Standard vorgibt. Auf Basis dieser Fakten wurde ein neues Vorgehen konzipiert, das die Nachteile überwindet.

Das Verfahren setzt sich aus mehreren Schritten zusammen. Zuerst wird eine Initialoberfläche festgelegt, beispielsweise durch die Festlegung von bestimmten geometrischen Objekten, z.B. einer Kugel, oder idealerweise durch das CAD-Modell des zu untersuchenden Objekts. Falls noch nicht gegeben erfolgt die Überführung des Ausgangsmodells in ein Oberflächennetz. Hierfür wird Vorwissen zum einen über das Objekt und zum anderen über die benötigten Eigenschaften des Ergebnisnetzes

eingearbeitet. Das bedeutet, dass die Auflösung des Netzes, also die Punktedichte, für einzelne Bereiche separat oder für das gesamte Objekt festgelegt werden kann, je nach Bedarf für die spätere Nutzung. Außerdem können nicht benötigte Bereiche weggelassen werden. Es wird folglich kontrolliert ein Dreiecksnetz erzeugt, welches den Anforderungen der jeweiligen Aufgabe entspricht. Ist beispielsweise nur das Innere eines Bauteils für Simulationen oder Messungen relevant, müssen nur diese Bereiche für die Oberflächenextraktion ausgewählt werden. Außerdem kann Vorwissen über das Objekt selbst, wieder separat für einzelne oder für alle Bereiche, angegeben werden. Dies sind Merkmale wie Materialeigenschaften, erwartete Grauwerte oder Gradienten an Materialübergängen und erwartete lokale Krümmungen der Oberfläche. Diese Angaben sind optional und müssen nicht vollständig vorhanden sein. Die initiale Oberfläche ist damit festgelegt und muss im Koordinatensystem des Voxeldatensatzes vorliegen oder in dieses überführt werden. Im nächsten Schritt wird das Oberflächennetz variiert, d.h. die Punkte in ihren Positionen verändert. Für die verschiedenen Positionen eines Punktes erfolgt eine Bewertung, die sich aus korrespondierenden Grauwertinformationen des Voxelvolumens und Informationen aus dem Oberflächennetz selbst zusammensetzt. Diese Informationen entsprechen den zuvor festgelegten Bedingungen und Erwartungen an die Oberfläche, z.B. der erwartete Grauwert oder Gradient und/oder eine maximal erlaubte Krümmung an der Oberfläche des jeweiligen Punktes. Für die verschiedenen Positionen und die damit einhergehende Netzform wird ermittelt, wie gut der aktuelle Zustand den Erwartungen bezüglich der genannten Kriterien entspricht. Bei diesem Schritt handelt es sich um ein iteratives Vorgehen, welche die Positionen wiederholt variiert bis das Ergebnis der Bewertung optimal ist bzw. einem festgelegten Abbruchkriterium genügt. Bei solchen Bewertungsfunktionen handelt es sich bei dem entwickelten Verfahren um Energiefunktionen entsprechend dem Verfahren der Aktiven Konturen, welche iterativ minimiert werden bis ein globales Minimum für die Bedingungen an die Oberfläche erreicht ist. Als Ergebnis erhält man eine bezüglich der Punktedichte und Aufgabenanforderungen optimale Oberfläche. Mit dem beschriebenen Verfahren ist es möglich, kontrolliert und der Aufgabe angemessene Oberflächendaten aus CT-Daten zu erzeugen. Es erlaubt die Vorabfestlegung der gesuchten Bereiche, der benötigten Punktedichte und der gesuchten Merkmale. Außerdem ist die Trennung und separate Oberflächenermittlung verschiedener Materialien möglich. Es werden keine nicht benötigten Punkte erzeugt, was eine Nachbearbeitung in Form einer Reduzierung erübrigt. Entfernte Oberflächen, die nicht zum Bauteil gehören, werden bei der Oberflächenermittlung nicht beachtet, sodass auch hier ebenfalls keine zusätzliche Bearbeitung nötig ist. Durch die Initialisierung der Oberfläche und die Angabe der Merkmale oder Suchbedingungen, handelt es sich um ein lokales und adaptives Oberflächenextraktionsverfahren, was bezüglich physikalischen oder bau-

---

teilspezifischen Effekten in Voxeldaten, wie variierende Grauwerttransitionen, eine deutlich verbesserte Oberflächenerzeugung gegenüber globalen Schwellwertverfahren erlaubt. Insgesamt erzeugt das Verfahren Oberflächen aus CT-Daten, die optimal auf die Anforderungen der späteren Nutzung und der nächsten Weiterverarbeitungsschritte angepasst sind und sowohl auf jegliche Vorverarbeitung des Voxelvolumens, z.B. Vorsegmentierung, als auch auf Nachbearbeitung der Oberfläche, wie Beschneidung oder Reduzierung, verzichten können.

Die folgende praktische Umsetzung und Evaluation des Verfahrens zeigte, dass die gestellten Anforderungen prinzipiell und mit einer angemessenen Datenqualität erfüllt werden, deckte jedoch auch bestehende Schwächen und Optimierungspotential auf. So bestehen Schwächen in der Formqualität, die teilweise auf die Irregularität der Dreiecke zurückgeführt werden konnte. Diese können die Krümmungsberechnung stark beeinträchtigen und Ausreißer verursachen, die zwar auf das Netz geringen Einfluss, jedoch bei der Berechnung der Formabweichung durchaus Gewicht haben. Eine Ausreißerfilterung in Form einer Zusatzbedingung konnte hier Abhilfe schaffen, stellt jedoch keine optimale Lösung dar. Darüber hinaus bestand eine Schwierigkeit in der Auswahl der passenden Gewichte für die Teilenergien. Während die Vielzahl der notwendigen Eingabeparameter automatisiert bestimmt werden konnten, um die Benutzerfreundlichkeit und einfache Handhabung zu gewährleisten, waren die Erfahrungen bei den Gewichten noch nicht ausreichend. Diese müssen so gewählt werden, dass ausreichend Einfluss der Grauwerte besteht um die korrekte Grenze zu finden, jedoch auch Grauwertschwankungen bei schwachen Kontrasten ausgeglichen werden. Dies erfordert zurzeit noch viel Praxiserfahrung mit CT-Daten und besitzt Optimierungsbedarf.

Insgesamt wurden die festgelegten Ziele erreicht und ein Verfahren entwickelt und realisiert, das

- die Trennung bzw. Segmentierung verschiedener Materialien vorgegeben durch geeignete Initialisierung und Wahl der Energiefunktionen erlaubt,
- Kontrolle über Punktdichte und über die erlaubte Abweichung vom CAD-Modell oder einer Regelgeometrie ermöglicht,
- die Festlegung bestimmter Bereiche und bereichsabhängige Dreiecksnetzunterteilung zulässt,
- eine lokale material- oder geometriebasierte Segmentierung beinhaltet,
- keine oder deutlich weniger Vor- und Nachbearbeitungsschritte benötigt,
- prinzipiell ohne exaktes CAD-Modell auskommt.

Zukünftige Weiterentwicklungen des Verfahrens bestehen sowohl in der Verbesserung des Verfahrens, als auch in der Anpassung und Erweiterung der Aufgabenstellungen und Anwendungsgebiete. Zunächst sollten die Probleme der beobachteten Abweichungen behoben werden, sodass die numerische Stabilität gewährleistet ist und die Qualität der Formabweichungen verbessert wird. Dazu kann einerseits eine Netzoptimierung der Initialdaten erfolgen, welche auch oft als Verbesserungsschritt beim Marching Cubes Verfahren genutzt wird. Erforderlich ist dabei jedoch ein unerwünschter Zusatzschritt in der Vorverarbeitung. Besser geeignet ist die Verwendung eines Triangulierungsverfahrens für Modelldaten, das bereits die Regularität der Dreiecke berücksichtigt. Hier ist eine weitere Analyse bestehender Verfahren und Implementierung passender Strategien notwendig.

Als weitere Optimierung steht die erwähnte Notwendigkeit der weiteren Automatisierung des Verfahrens. Da es sich hier jedoch um ein nutzergesteuertes, anpassbares Vorgehen handelt, soll lediglich ein Vorschlag gegeben werden. Dies betrifft zum einen die bereits genannte Gewichtung der Teilenergien, aber auch die Auswahl der richtigen Energiefunktionen selbst. Beides kann über eine erweiterte Voranalyse der Grauwertprofile sowie über die gegebenen Krümmungsumgebungen geschehen. Die zwei Optimierungsmöglichkeiten wurden in dieser Arbeit bereits teilweise durchgeführt, konnten jedoch nicht umfassend eingearbeitet werden, da die nötigen Zusammenhänge nicht bekannt sind. Das bedeutet, es bedarf einer ausführlichen Studie über die Form, Verteilung und Streuung der Grauwerte und -verläufe, welche zu Schlussfolgerungen über die richtige Wahl der Gewichtung und der zu nutzenden Grauwertenergie führt. Analog dazu kann für die Krümmungsenergie in Abhängigkeit der initialen Form eine Auswahl erfolgen, die z.B. Krümmungskriterien der gegebenen CAD-Oberflächen nutzt. Bei einer solchen Untersuchung muss ebenfalls der Nutzen einer individuellen Parametrisierung und Bewertung für jeden Punkt untersucht werden. Dies kann weitere Vorteile bei verrauschten oder artefaktbehafteten CT-Daten bringen. Diese Untersuchungen dienen der Ermittlung rückführbarer Eingabeparameter, welche für die Gewährleistung der Reproduzierbarkeit und einer angemessenen, aufgabenabhängigen Varianz der Ergebnisse unabdingbar sind.

Abschließend benötigt das implementierte Verfahren eine Überarbeitung zur Optimierung der Laufzeit. Aufgrund der lokalen Bewertung und Minimierung bietet sich eine Parallelisierung an, welche starke Beschleunigung verspricht. Darüber hinaus müssen aufgrund der großen Datenmengen der gegebenen Volumendatensätze, eine Vielzahl an Daten eingelesen und verarbeitet werden. Optimierungen und Vorverarbeitungen in den angelegten Datenstrukturen und der Speichernutzung lassen zusätzlich große Zeitersparnisse in der Berechnung vermuten. Ebenso ist eine 64-Bit Kompilierung vorgesehen, um größeren Arbeitsspeicher nutzen zu können.

---

Neben den Verbesserungsschritten gilt es auch einen Ausblick auf zukünftige Erweiterungen und Anwendungsmöglichkeiten zu geben. Diese sind, wie bereits beschrieben, leicht durch die Einführung weiterer Energiefunktionen umsetzbar. Prinzipiell ist jede Bedingung anwendbar, die sich als Energiefunktionen formulieren und minimieren lässt. Denkbar sind hier alle Strukturen, die sich aus Voxeldaten oder gegebenen Geometrieinformationen entnehmen lassen, beispielsweise eine 2D- oder 3D-Textur, abgebildete Materialeigenschaften oder Oberflächenrauheit. Dabei ist die Ein- und Ausgabe der Oberflächendaten flexibel. Es können ebenso mehrere Materialgrenzen innerhalb eines Grauwertprofils detektiert und verarbeitet werden, was z.B. zu einer schnellen Spalt- oder Wandstärkenanalyse führt. Darüber hinaus ist es möglich, eine direkte Kombination mit weiterführenden Auswerteschritten zu realisieren. Das Ergebnis der Energieminimierung beinhaltet die Differenz zwischen dem Ist- und dem Sollzustand jedes Punktes, sodass sich diese intrinsische Information bereits während der Oberflächenbestimmung statistisch auswerten lässt. Auf diese Weise lassen sich auch einzelne Maße, Wandstärken und Abweichungen von Sollgeometrien ohne weitere Auswerteschritte ermitteln. Dies bedarf lediglich einen geringen Modifikationsaufwand des implementierten Verfahrens.

Das hier entwickelte Verfahren zur kontrollierten, aufgabenangepassten Oberflächenextraktion aus volumetrischen Computertomographiedaten bietet die Möglichkeit zur Lösung einer Vielzahl von messtechnischen Problemstellungen für verschiedene Bauteiltypen und verspricht aufgrund seiner Anpassbarkeit und Erweiterbarkeit großes Potential zur Bewältigung zukünftiger Herausforderungen der CT-Technologie.



---

## 8. Summary

Industrial computer tomography (CT) is increasingly used for metrological and further evaluations. Here, new strategies of 3D data processing are needed in order to meet more diverse and complex requirements arising from new applications. One key to achieve this goal is surface extraction from volume CT data. These surfaces then provide important information about material properties of a part which are essential for answering metrological questions, or for further use in CAD processing or simulations software.

In this work, we give an overview of the strengths and weaknesses of CT technology and survey the spectrum of its tasks and applications. In addition, we discuss existing approaches for the segmentation of regions or the determination of boundaries from classical image processing and examine state-of-the-art surface extraction techniques in regard to shortcomings for a set of given problems and tasks. In particular, we analyse the current standard - the marching cubes algorithm - in both an adapted and an expanded form. Based on these observations, a new approach was developed which addresses and overcomes these disadvantages.

The new process consists of several steps: First, an initial surface is determined, for example based on certain geometric objects like a sphere, or ideally by the CAD model of the object itself. Then, the initial model is discretised in a meshing step. Here, knowledge about both the object and its required properties are taken into account. More precisely, the resolution of the surface mesh, i.e. the point density, can be specified for special areas separately or for the object as a whole depending on the needs for later use. Also unused areas can be ignored. Altogether, this ensures a triangular mesh is generated in a controlled way which meets the requirements of the task. For example, if only the inner surface of a part is relevant for simulations or measurements, only this area is relevant for surface extraction. In addition, prior

knowledge about the object itself can be provided for some or for all areas. This includes information about material properties, expected intensity values or intensity gradients of material transitions and expected local curvature of the surface. Following this, the surface is transferred into the coordinate system of the voxel data. Now, the surface mesh is adapted, i.e. the positions of the mesh nodes are varied: Every node position is evaluated by composing corresponding gray value information, voxel volume, and surface information. This information corresponds to the previously expected properties of the surface, e.g. the expected gray value or gradient and/or a maximum allowed curvature of the surface of the respective node. For each variation of the node positions and its associated mesh configuration it is determined how well the current state corresponds to the respective expectations. This step is implemented as an iterative procedure which varies the positions until the result of the evaluation is optimal or a specified termination criterion is satisfied. Energy functions are used for evaluation according to the method of active contours, which are minimized iteratively until a global minimum for the conditions to the surface is reached. The result is an optimal surface with respect to point density and task-specific parameters .

As a consequence, this method has a number of important features: Surface data is generated from CT data in a controlled way and appropriate to the task; the method allows the predetermination of required areas, required point density and the features of interest; separation and determination of various materials is possible; no unnecessary points are generated, and thus no post processing reduction step is needed; and irrelevant distant surfaces are not considered in determining the surface. Finally, due to the approach being local and adaptive, surface generation is significantly improved with respect to global thresholding regarding physical or component-specific effects in voxel data, such as varying gray level transitions.

On the whole, the new method extracts surfaces from CT data, which are optimally adapted to the requirements of the later use and the next processing steps without any need for pre or post processing. An implementation and experiments using the new method confirmed the above observations. Using sample data of adequate quality, requirements are met in principle. However, weaknesses and optimization potentials remain.

The experiments suggest that weaknesses in the form of quality are due to the irregularity of the triangulation. This, in turn, considerably affects curvature calculation and causes outliers. Although these effects are small in regard to the mesh as a whole, they are significant when calculating the deviation in shape. We addressed this issue by filtering outliers by an additional condition but this is not regarded as an optimal solution. Moreover, choosing appropriate weights for the partial energy functions

---

posed a difficulty. While we were able to determine the number of necessary input parameters automatically we did not succeed to do so with the weights. These must be chosen such that on the one hand adequate influence of the gray values is guaranteed to find the correct boundary, but on the other hand gray value fluctuations are compensated. At the moment this requires additional experience with CT data and a need for optimization remains.

Overall, the implementation of our method achieved our goals and incorporates the following main advantages:

- The separation or segmentation of various materials specified by an appropriate initialization and choice of energy functions.
- Control of point density and the permitted deviation from the CAD model or specified geometry.
- The definition of certain areas and area-dependent triangulation.
- Local material or geometry-based segmentation.
- No or significantly less pre- and post-processing steps.
- No need of an accurate CAD model.

The developed method for the controlled, task-fitted surface extraction from volumetric computed tomography data offers the possibility to solve a variety of metrological problems for different types of parts and, due to its adaptability and extensibility, promises great potential to meet future challenges of the CT technology.



---

# Literatur

- [Ahn04] AHN, S. J.: *Least squares orthogonal distance fitting of curves and surfaces in space*. Berlin: Springer, 2004
- [App03] APPELTON, B.: Optimal Geodesic Active Contours: Application Heart Segmentation. In: LOVELL, B.C. (Hrsg.); MAEDER, A.J. (Hrsg.): *Proceedings of the 2003 APRS Workshop on Digital Image Computing, Brisbane, Australia, 7 February 2003*. Brisbane: Australian Pattern Recognition Society, 2003, S. 27–31
- [ATW88] AMINI, A. A.; TEHRANI, S.; WEYMOUTH, T. E.: Usind dynamic programming for minimizing the energy of active contours in the presence of hard constraints. In: *Proceedings Second International Conference on Computer Vision, Tampa, Florida, USA, 5-8 December 1988*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 1988, S. 95–99
- [AYK03] AOKI, K.; YOKOTA, H.; KANEKO, T.: Surface reconstruction with volume preservation. In: *11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Canmore, Canada, 8-10 October 2003*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 2003, S. 399–403
- [Bar08] BARTH, M.: *Entwicklung und Qualitätssicherung funktionsorientierter Produkte für generative Fertigungsverfahren*. Pforzheim, Hochschule, Diplomarbeit, 2008
- [BBML11] BELAID, A.; BOUKERROUI, D.; MAINGOURD, Y.; LERALLUT, J.: Phase-Based Level Set Segmentation of Ultrasound Images. In: *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 15 (2011), Nr. 1, S. 138–147
- [BFL06] BOYKOV, Y.; FUNKA-LEA, G.: Graph Cuts and Efficient N-D Image Segmentation. In: *International Journal of Computer Vision* 70 (2006), Nr. 2, S. 109–131

- [Ble08] BLESSING, N.: *Segmentierung von industriellen 3D-CT-Voxelmodellen durch dynamische Schwellwertberechnung*. Heimsheim: Jost-Jetter-Verlag, 2008
- [Blo88] BLOOMENTHAL, J.: Polygonization of implicit surfaces. In: *Computer Aided Geometric Design* 5 (1988), Nr. 4, S. 341–355
- [BMR<sup>+</sup>99] BERNARDINI, F.; MITTLEMAN, J.; RUSHMEIER, H.; SILVA, C.; TAUBIN, G.: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (1999), Nr. 5, S. 349–359
- [BP94] BOEHM, W.; PRAUTZSCH, H.: *Geometric concepts for geometric design*. Wellesley (Massachusetts, USA): A.K. Peters, 1994
- [Bre65] BRESENHAM, J. E.: Algorithm for computer control of a digital plotter. In: *IBM Systems Journal* 4 (1965), Nr. 1, S. 25–30
- [CC92] COHEN, L. D.; COHEN, I.: Deformable Models for 3D Medical Images using Finite Elements & Balloons. In: *Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference On Computer Vision And Pattern Recognition (CVPR '92), Champaign, Illinois, USA, 15-18 June 1992*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 1992, S. 592–598
- [Che95] CHERNYAEV, E. V.: Marching Cubes 33: Construction of Topologically Correct Isosurfaces. In: *GraphiCon'95, Saint-Petersburg, Russia, 3-7 July, 1995*. Genf, CH: European Organization for Nuclear Research (CERN), 1995
- [CMM<sup>+</sup>97] CIGNONI, P.; MARINO, P.; MONTANI, C.; PUPPO, E.; SCOPIGNO, R.: Speeding up isosurface extraction using interval trees. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3 (1997), Nr. 2, S. 158–170
- [CN11] CHRISTOPH, R.; NEUMANN, H. J.: *Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik: Präzise, wirtschaftlich und universell*. 1., neue Ausg. München: Süddeutscher Verlag onpact, 2011
- [Coh91] COHEN, L. D.: On active contour models and balloons. In: *CVGIP: Image Understanding* 53 (1991), Nr. 2, S. 211–218
- [CT92] COOTES, T. F.; TAYLOR, C. J.: Active Shape Models - Smart Snakes. In: BOYLE, R. (Hrsg.); HOGG, D. (Hrsg.): *Proceedings of the British Machine Vision Conference, Leeds, UK, 22-24 September 1992*. London [u.a.]: Springer, 1992, S. 266–275

- [CT04] COOTES, T. F.; TAYLOR, C. J.: Statistical Models of Appearance for Computer Vision. (2004). [http://www.isbe.man.ac.uk/~bim/Models/app\\_models.pdf](http://www.isbe.man.ac.uk/~bim/Models/app_models.pdf), Abruf: 21.10.2012
- [CTCG95] COOTES, T. F.; TAYLOR, C. J.; COOPER, D. H.; GRAHAM, J.: Active Shape Models-Their Training and Application. In: *Computer Vision and Image Understanding* 61 (1995), Nr. 1, S. 38–59
- [CVNTE07] CUADROS-VARGAS, Alex J.; NONATO, Luis G.; TEJADA, E.; ERTL, T.: Generating Segmented Tetrahedral Meshes from Regular Volume Data for Simulation and Visualization Applications. In: *Proceedings of CompIMAGE, 20.-21. Oktober 2006, Coimbra (Portugal)*. London: Taylor & Francis, 2007, S. 27–36
- [DDF02] DANOVARO, E.; DE FLORIANI, L.: Half-edge multi-tessellation: compact representation for multi-resolution tetrahedral meshes. In: *First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, 19-21 June 2002, Padova (Italy)*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 2002, S. 494–499
- [Del34] DELAUNAY, B. N.: Sur la sphère vide. In: *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR* (1934), Nr. 6, S. 793–800
- [Deu95] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. - DIN 1319-1, 1995-01: *Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth, 1995
- [Deu12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. - DIN EN ISO 15530-3, 2012-01: *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen*. Berlin: Beuth, 2012
- [DMM01] DESOLNEUX, A.; MOISAN, L.; MOREL, J.-M.: Edge Detection by Helmholtz Principle. In: *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 14 (2001), Nr. 3, S. 271–284
- [DMM08] DESOLNEUX, A.; MOISAN, L.; MOREL, J.-M.: The Helmholtz Principle. In: ANTMAN, S. S. (Hrsg.); SIROVICH, L. (Hrsg.); MARSDEN, J. E. (Hrsg.); WIGGINS, S. (Hrsg.): *From Gestalt Theory to Image Analysis*. New York: Springer, 2008, S. 31–45

- [DMSB99] DESBRUN, M.; MEYER, M.; SCHRÖDER, P.; BARR, A. H.: Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. In: *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 08-13 August 1999, Los Angeles (USA)*. New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999, S. 317–324
- [DMSB03] DESBRUN, M.; MEYER, M.; SCHRÖDER, P.; BARR, A. H.: Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds. In: HEGE, H.-C (Hrsg.); POLTHIER, K. (Hrsg.): *Visualization and Mathematics III*. Berlin: Springer, 2003, S. 35–57
- [Dös99] DÖSSEL, O.: *Bildgebende Verfahren in der Medizin: Von der Technik zur medizinischen Anwendung*. Berlin: Springer, 1999
- [DSS+09] DIETRICH, C. A.; SCHEIDEGGER, C. E.; SCHREINER, J.; COMBA, J. L. D.; NEDEL, L. P.; SILVA, C. T.: Edge Transformations for Improving Mesh Quality of Marching Cubes. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15 (2009), Nr. 1, S. 150–159
- [Ehr04] EHRHARDT, J.: *Atlasbasierte Erkennung anatomischer Strukturen und Landmarken für die dreidimensionale virtuelle Planung von Hüftoperationen*. Norderstedt: Books on Demand, 2004
- [EKV08] EFFENBERGER, I.; KROLL, J.; VERL, A.: Innovative solutions for 3D computer tomography data evaluation in industrial applications. In: DIETZSCH, M. (Hrsg.): *Proceedings / XII. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, 28.-29. Januar 2008*. Aachen: Shaker, 2008, S. 364–373
- [ESG+10] EHRIG, K.; STAUDE, A.; GOEBBELS, J.; BARTSCHER, M.; KOCH, M.; NEUKAMM, M.: Evaluierung von Testkörpern zur Strahlaufhärtungskorrektur beim dimensionellen Messen mit Computertomographie. In: KASTNER, J. (Hrsg.): *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria, 27.-29. September 2010*. Aachen: Shaker, 2010, S. 181–186
- [ESW06] EFFENBERGER, I.; STOTZ, M.; WESTKÄMPER E.: Automatische Segmentierung von Messpunktewolken in regelgeometrische Elemente. In: *tm Technisches Messen* 73 (2006), Nr. 1, S. 60–66
- [FJH10] FLISCH, A.; JERJEN, I.; HANIMANN, P.: Einfluss wichtiger Kenngrößen auf die Messunsicherheit bei der Datenerfassung mit Computertomographie. In: KASTNER, J. (Hrsg.): *Proceedings Industrielle Computerto-*

- mografie, Fachtagung Wels, Austria, 27.-29. September 2010.* Aachen: Shaker, 2010, S. 145–154
- [FKDS07] FRITZ, D.; KROLL, J.; DILLMANN, R.; SCHEUERING, M.: Automatic 4D segmentation of the left ventricle in cardiac-CT data. In: *Medical Imaging 2007: Image Processing, San Diego, CA, USA, 17-22 February, 2007.* Bellingham, USA: SPIE Press, 2007
- [Fra08] FRANZ, M.: *EAR - Einsatzsynchrone Artefakt-Reduktion.* Erlangen-Nürnberg, Universität, Diss., 2008
- [FTM<sup>+</sup>08] FLISCH, A.; THIERRY, R.; MICELI, A.; HOFMANN, J.; SIMON, M.; SAUERWEIN, C.; CASALI, F.; BETTUZZI, M.; MORIGI, M.: Neue Entwicklungen für schnelle Computertomografie zur Prüfung von Gussprodukten. In: KASTNER, J. (Hrsg.): *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria, 26.-28. Februar 2008.* Aachen: Shaker, 2008, S. 109–116
- [GGK02] GOTSMAN, C.; GUMHOLD, S.; KOBELT, L.: Simplification and Compression of 3D Meshes. In: *Tutorials on Multiresolution in Geometric Modelling: Summer School Lecture Notes.* Berlin: Springer, 2002, S. 319–361
- [GH97] GARLAND, M.; HECKBERT, P. S.: Surface simplification using quadric error metrics. In: *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '97), Los Angeles, USA, 03-08 August, 1997.* New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997, S. 209–216
- [Gre07] GREGORY, R. L.: Helmholtz's principle. In: *Perception* 36 (2007), Nr. 6, S. 795–796
- [GW94] GELDER, A. van; WILHELMS, J.: Topological Considerations in Iso-surface Generation. In: *ACM Transactions on Graphics* 13 (1994), S. 337–375
- [GW08] GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.: *Digital image processing.* 3. Upper Saddle River (N.J.): Pearson Prentice Hall, 2008
- [Har98] HARTMANN, E.: A marching method for the triangulation of surfaces. In: *The Visual Computer* 14 (1998), Nr. 3, S. 95–108
- [Har09] HART, P.: How the Hough transform was invented. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 26 (2009), Nr. 6, S. 18–22

- [HGB93] HEIDEN, W.; GOETZE, T.; BRICKMANN, J.: Fast generation of molecular surfaces from 3D data fields with an enhanced “marching cube” algorithm. In: *Journal of Computational Chemistry* 14 (1993), Nr. 2, S. 246–250
- [HGRK85] HEIDT, H.; GOEBBELS, J.; REIMERS, P.; KETTSCHAU, A.: Development and Application of a Universal CAT-Scanner. In: *WCNDT 85: 11th World conference on nondestructive testing, Las Vegas, 3-8 November 1985*. Columbus, Ohio: The Conference, 1985, S. 664–671
- [HK06] HORNING, A.; KOBELT, L.: Robust reconstruction of watertight 3D models from non-uniformly sampled point clouds without normal information. In: *SGP '06: Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing, Cagliari, Sardinia, Italy, June 26-28, 2006*. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2006, S. 41–50
- [HSOS10] HAITHAM SHAMMAA, M.; OHTAKE, Y.; SUZUKI, H.: Segmentation of multi-material CT data of mechanical parts for extracting boundary surfaces. In: *Computer-Aided Design* 42 (2010), Nr. 2, S. 118–128
- [Int] INTEL SOFTWARE NETWORK: *ComputeThreshold\_Otsu*. [http://software.intel.com/sites/products/documentation/hpc/ipp/ippi/ippi\\_ch7/functn\\_ComputeThreshold\\_Otsu.html](http://software.intel.com/sites/products/documentation/hpc/ipp/ippi/ippi_ch7/functn_ComputeThreshold_Otsu.html), Abruf: 25.08.2012
- [ISO08] ISO/IEC GUIDE 98-3:2008: *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. 2008
- [Jäh05] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. 6., überarb. und erw. Auflage. Berlin: Springer, 2005
- [Kal06] KALENDER, W. A.: *Computertomographie: Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen*. Erlangen: Publicis Corp. Publ., 2006
- [KEV12] KROLL, J.; EFFENBERGER, I.; VERL, A.: Adaptive preprocessing and segmentation for a region-based surface extraction method. In: KASTNER, Johann (Hrsg.): *Conference on Industrial Computed Tomography (ICT), Wels, Austria, 19.-21. September 2012*. Aachen: Shaker, 2012, S. 289–295

- 
- [KH09] KASPERL, S.; HILLER, J.: Artefaktkorrekturen beim dimensionellen Messen mit industrieller Röntgen-Computertomographie. In: *tm Technisches Messen* 76 (2009), Nr. 9, S. 401–409
- [KHS10] KASPERL, S.; HILLER, J.; SCHÖN, T.: Dimensionelles Messen mit Helix-Computertomographie. In: SACKEWITZ, Michael (Hrsg.): *Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik - Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2010, S. 12–14
- [KWT88] KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D.: Snakes: Active contour models. In: *International Journal Of Computer Vision* 1 (1988), Nr. 4, S. 321–331
- [LA93] LI, J.; AGATHOKLIS, P.: A case study of isosurface generation in 3D visualization. In: *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, Victoria, British Columbia, Canada, 19-21 May 1993* Bd. 2. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 1993, S. 622–625
- [LC87] LORENSEN, W. E.; CLINE, H. E.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In: *ACM Siggraph Computer Graphics* 21 (1987), Nr. 4, S. 163–169
- [LFGW00] LEVENTON, M.; FAUGERAS, O.; GRIMSON, E.; WELLS, W.: Level Set Based Segmentation with Intensity and Curvature Priors. In: *IEEE Workshop on Mathematical Methods in Biomedical Image Analysis (MMBIA-2000), Hilton Head Island, South Carolina, USA, 11-12 June 2000*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 2000, S. 4–11
- [LLWVT03] LEWINER, T.; LOPES, H.; WILSON VIEIRA, A.; TAVARES, G.: Efficient Implementation of Marching Cubes' Cases with Topological Guarantees. In: *Journal of graphics, gpu, and game tools* 8 (2003), Nr. 2, S. 1–15
- [LSJ96] LIVNAT, Y.; SHEN, H.-W.; JOHNSON, C. R.: A near optimal isosurface extraction algorithm using the span space. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 2 (1996), Nr. 1, S. 73–84
- [LY94] LAM, K.-M.; YAN, H.: Fast greedy algorithm for active contours. In: *Electronics Letters* 30 (1994), Nr. 1, S. 21
- [MCK<sup>+</sup>99] MATSUDA, H.; CINGOSKI, V.; KANEDA, K.; YAMASHITA, H.; TAKEHARA, J.; TATEWAKI, I.: Extraction and visualization of semitransparent

- isosurfaces for 3-D finite element analysis. In: *IEEE Transactions on Magnetism* 35 (1999), Nr. 3, S. 1365–1368
- [MKSK10a] MAASS, C.; KNAUP, M.; SAWALL, S.; KACHELRIESS, M.: ROI-Tomografie (Lokale Tomografie). In: KASTNER, J. (Hrsg.): *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria, 27.-29. September 2010*. Aachen: Shaker, 2010, S. 251–259
- [MKSK10b] MAASS, C.; KNAUP, M.; SAWALL, S.; KACHELRIESS, M.: Simple ROI cone-beam computed tomography. In: *Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), Knoxville, Tennessee, USA, 30 Oct.-6 Nov. 2010*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 2010, S. 3161–3168
- [Mol05] MOLLET, N. R.: Non-invasive multislice CT coronary imaging. In: *Heart* 91 (2005), Nr. 3, S. 401–407
- [MSR07] MAGID, E.; SOLDEA, O.; RIVLIN, E.: A Comparison of Gaussian and mean curvature estimation methods on triangular meshes of range image data. In: *CVIU* 107 (2007), Nr. 3, S. 139–159
- [MSV95] MALLADI, R.; SETHIAN, J. A.; VEMURI, B. C.: Shape modeling with front propagation: a level set approach. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17 (1995), Nr. 2, S. 158–175
- [MT96] MCINERNEY, T.; TERZOPOULOS, D.: Deformable models in medical image analysis: A survey. In: *Medical Image Analysis* 1 (1996), S. 91–108
- [MT00] MCINERNEY, T.; TERZOPOULOS, D.: T-snakes: Topology adaptive snakes. In: *Medical Image Analysis* 4 (2000), Nr. 2, S. 73–91
- [MZFC09] MEINHARDT, E.; ZACUR, E.; FRANGI, A. F.; CASELLES, V.: 3D Edge Detection by Selection of Level Surface Patches. In: *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 34 (2009), Nr. 1, S. 1–16
- [NBF<sup>+</sup>02] NIESSEN, W. J.; BEMMEL, C. M.; FRANGI, A. F.; SIERS, M. J. A.; WINK, O.: Model-based segmentation of cardiac and vascular images. In: *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2002), Washington D.C., USA, 7-10 July 2002*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 2002, S. 22–25

- [Nöt09] Schutzrecht DE102007039919A1 ( 12.03.2009). NÖTTLING, A. (Erfinder); Siemens AG (Anmelder).
- [NY06] NEWMAN, T. S.; YI, H.: A survey of the marching cubes algorithm. In: *Computers & Graphics* 30 (2006), Nr. 5, S. 854–879
- [Opea] OPENCASCADE TECHNOLOGY: *Open CASCADE Technology, 3D modeling & numerical simulation*. <http://www.opencascade.org>, Abruf: 27.11.2012
- [Opeb] OPENGL: *OpenGL - The Industry's Foundation for High Performance Graphics*. <http://www.opengl.org>, Abruf: 21.10.2012
- [OS88] OSHER, S.; SETHIAN, J. A.: Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations. In: *Journal Of Computational Physics* 79 (1988), Nr. 1, S. 12–49
- [Ots79] OTSU, N.: A threshold selection method from gray level histograms. In: *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics* 9 (1979), S. 62–66
- [Pag] PAGODA SYSTEMS SOFTWARE SOLUTIONS: *Pagoda Systems Software Solutions*. <http://www.pagoda-systems.de/index.html>, Abruf: 27.11.2012
- [Pan05] PANNEKAMP, J.: *Adaptive Verfahren zur Bewertung texturierter Oberflächen, Stuttgart, Universität, Diss., 2004*. Heimsheim: Jost-Jetter, 2005
- [PBP02] PRAUTZSCH, H.; BOEHM, W.; PALUSZNY, M.: *Bézier and B-spline techniques*. Berlin; New York: Springer, 2002
- [PD01] PAN, S.; DAWANT, B. M.: Automatic 3D segmentation of the liver from abdominal CT images: a level-set approach. In: *Medical Imaging 2001: Image Processing, San Diego, USA, 19-22 February 2001*. Bellingham, USA: SPIE Press, 2001, S. 128–138
- [PHBG09] PATEL, D.; HAIDACHER, M.; BALABANIAN, J.-P.; GRÖLLER, E.: Moment Curves. In: EADES, P. (Hrsg.); ERTL, T. (Hrsg.); SHEN, Han-Wei (Hrsg.): *Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium 2009, 20.-23. April, Peking (China)*. Washington D.C.: IEEE Computer Society Press, 2009, S. 201–208
- [Pov] POVRAY: *PovRay - Persistence of Vision*. <http://www.povray.org>, Abruf: 21.10.2012

- [PRH09] PRASSNI, J.-S.; ROPINSKI, T.; HINRICHS, K. H.: Efficient Boundary Detection and Transfer Function Generation in Direct Volume Rendering. In: *Proceedings of the 14th International Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization (VMV09)*, 16.-18. August 2009, Braunschweig, 2009, S. 285–294
- [RB05] RAZDAN, A.; BAE, M.: Curvature estimation scheme for triangle meshes using biquadratic Bézier patches. In: *Computer-Aided Design 37* (2005), Nr. 14, S. 1481–1491
- [Rei] REINERS, D. AND VOSS, G. AND NEUMANN, C.: *OpenSG*. <http://www.opensg.org>, Abruf: 13.01.2013
- [Ren] RENISHAW PLC: *TP200*. <http://www.renishaw.de/de/tp200--6671>, Abruf: 12.12.2012
- [RG83] REIMERS, P.; GOEBBELS, J.: New possibilities of nondestructive evaluation by X-ray computed tomography. In: *Material Evaluation ME 41* (1983), Nr. 6, S. 732–737
- [RHS<sup>+</sup>10] REITER, M.; HEINZL, C.; SALABERGER, D.; WEISS, D.; KUHN, C.; KASTNER, J.: Simulative Parameteroptimierung für Metrologie an Multi-Materialbauteilen mit industrieller Röntgen Computertomografie. In: KASTNER, J. (Hrsg.): *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria, 27.-29. September 2010*. Aachen: Shaker, 2010, S. 163–174
- [RKF<sup>+</sup>11] REISINGER, S.; KASPERL, S.; FRANZ, M.; HILLER, J.; SCHMID, U.: Simulation-Based Planning of Optimal Conditions for Industrial Computed Tomography. In: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, Berlin, 20-22 June 2011*. Berlin: Dt. Ges. für Zerstörungsfreie Prüfung, 2011
- [SBSG06] SEREDA, P.; BARTOLI, A. V.; SERLIE, I. W. O.; GERITSEN, F. A.: Visualization of boundaries in volumetric data sets using lh histograms. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 12* (2006), Nr. 2, S. 208–218
- [Sch98] SCHOLT, T.: Einführung in die Theorie der Tschebyscheff-Reihen zur Approximation nichtlinearer Systeme / Universität Duisburg, Fachbereich Meß-, Steuer- und Regelungstechnik. 1998. – Forschungsbericht

- [SD03] SHANG, Y.; DÖSSEL, O.: Landmarking Method of 3D Surface Models for Construction of 4D Cardiac Shape Model. In: *Biomedizinische Technik* 48 (2003), Nr. 1, S. 124–125
- [Set99] SETHIAN, J. A.: *Level set methods and fast marching methods: Evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science*. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- [SGS11] SCHÖRNER, K.; GOLDAMMER, M.; STEPHAN, J.: Scatter Correction by Modulation of Primary Radiation in Industrial X-ray CT: Beam-hardening Effects and their Correction. In: *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, Berlin, 20-22 June 2011*. Berlin: Dt. Ges. für Zerstörungsfreie Prüfung, 2011
- [SHB08] SONKA, M.; HLAVAC, V.; BOYLE, R.: *Image processing, analysis, and machine vision*. 3. Aufl. Toronto: Thompson Learning, 2008
- [SSS06] SCHREINER, J.; SCHEIDEGGER, C. E.; SILVA, C. T.: High Quality Extraction of Isosurfaces from Regular and Irregular Grids. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12 (2006), Nr. 5, S. 1205–1212
- [ST90] SHIRLEY, P.; TUCHMAN, A.: A polygonal approximation to direct scalar volume rendering. In: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 24 (1990), Nr. 5, S. 63–70
- [Ste05] STEINBEISS, H. P.: *Dimensionelles Messen mit Mikro-Computertomographie*. München: Hieronymus, 2005
- [Str] STRATASYS LTD: *PolyJet Technologie*. [http://objet.de/Produkte/PolyJet\\_Technologie](http://objet.de/Produkte/PolyJet_Technologie), Abruf: 20.01.2013
- [Str11] STRUTZ, T.: *Data fitting and uncertainty: A practical introduction to weighted least squares and beyond*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011
- [TCG92] TAYLOR, C. J.; COOPER, D. H.; GRAHAM, J.: Training models of shape from sets of examples. In: BOYLE, R. (Hrsg.); HOGG, D. (Hrsg.): *Proceedings of the British Machine Vision Conference, Leeds, UK, 22-24 September 1992*. London [u.a.]: Springer, 1992, S. 9–18
- [VDI11] Richtlinie VDI/VDE 2630 Blatt 1.2: 2010-11. *Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik: Einflussgrößen auf das Messergebnis und Empfehlungen für dimensionelle Computertomographie-Messungen*

- [VDI12] Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 13 - VDI/VDE 2630 Blatt 1.3: 2011-12. *Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren*
- [Vol] VOLUME GRAPHICS: *VGStudio*. [www.volumegraphics.com](http://www.volumegraphics.com), Abruf: 30.07.2012
- [WE02] WEILER, M.; ERTL, T.: Ein Volume-Rendering-Framework für OpenSG. In: *Proceedings of OpenSG Symposium 2002, 29. Januar 2002, Darmstadt, 2002*
- [Wera] WERTH MESSTECHNIK: *Werth 3D-Fasertaster - hochgenaue dreidimensionale Messung*. <http://www.werth.de/de/navigation/werth-aktuell/werth-3d-fasertaster.html>, Abruf: 12.12.2012
- [Werb] WERTH MESSTECHNIK: *Werth TomoScope® HV 500*. <http://www.werth.de/de/unsere-angebote/produkte-nach-kategorie/koordinatenmessgeraete/fuer-computertomografie/werth-tomoscope-hv-500.html>, Abruf: 12.12.2012
- [Werc] WERTH MESSTECHNIK: *WinWerth® WinWerth - Die bedienerfreundliche 3D Mess-Software*. <http://www.werth.de/de/unsere-angebote/produkte-nach-kategorie/software/winwerth.html>, Abruf: 12.12.2012
- [WG92] WILHELMS, J.; GELDER, A. van: Octrees for faster isosurface generation. In: *ACM Transactions on Graphics* 11 (1992), Nr. 3, S. 201–227
- [WS92] WILLIAMS, D. J.; SHAH, M.: A fast algorithm for active contours and curvature estimation. In: *CVGIP: Image Understanding* 55 (1992), Nr. 1, S. 14–26
- [WSBD00] WOOD, Z. J.; SCHRÖDER, P.; BREEN, D.; DESBRUN, M.: Semi-regular mesh extraction from volumes. In: *Proceedings of the conference on Visualization '00, Salt Lake City, USA, 8-13 October, 2000*. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society Press, 2000, S. 275–282
- [XP97] XU, C.; PRINCE, J. L.: Gradient Vector Flow: A New External Force for Snakes. In: *Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97), San Juan, Puerto Rico, 17-19 June 1997*. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 1997, S. 66–71
- [XP98] XU, C.; PRINCE, J. L.: Active Contours, Deformable Models, and Gradient Vector Flow. (1998). <http://www.iacl.ece.jhu.edu/static/gvf/>, Abruf: 17.10.2012

- [ZBL09] ZHENG, P.; BELATON, B.; LIAO, I. Y.: Isosurface Extraction of Volumetric Data Using Implicit Surface Polygonization. In: *Third Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS '09), Bandung/Bali, Indonesia, 25-29 May 2009*. Washington D.C: IEEE Computer Society, 2009, S. 555–559
- [ZTHL02] ZHAO, M.; TIAN, J.; HE, H.; LI, G.: A new 3D surface reconstruction method and its application in industrial CT. In: *The 7th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, Rio de Janeiro, Brazil, 25-27 September 2002*. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 2002, S. 162–165



---

## A. Eingabeparameter der Implementierung

<i>MaxTriDeflec</i>	Maximal erlaubte Abweichung zwischen Triangulierung und CAD-Modell (Maximum Deflection)
<i>MaxEdgeLen</i>	Maximal erlaubte Kantenlänge bei der Triangulierung
<i>MinPntCnt</i>	Minimale Anzahl an Punkten für die Triangulierung
<i>GWSize</i>	Größe des Grauwertprofils in positiver und negativer Normalenrichtung
<i>GWPartSize</i>	Größe des zu untersuchenden Abschnitts des Grauwertprofils pro Iteration in positiver und negativer Normalenrichtung
<i>nomGW</i>	Nominaler Grauwert, entspricht Schwellwert für $E_{Thresh}$ oder der gesuchten Profilseite mit 1: links, 2: rechts oder 0: Gradientensuche
<i>nomGrad</i>	Nominaler Gradient, entspricht Sollgradient oder bei -1: Maximaler Gradient
<i>nomCurv</i>	Nominale Krümmung, bei 0: Flachheitsbedingung
<i>MaxItVox</i>	Maximale Anzahl an Iterationen bei voxelgenauer Minimierung
<i>MinMovePntsVox</i>	Minimale Anzahl der Positionsvariationen im aktuellen Iterationsschritt bei voxelgenauer Minimierung
$u_{Vox}$	Gewicht für Grauwertenergie bei voxelgenauer Minimierung
$v_{Vox}$	Gewicht für Krümmungsenergie bei voxelgenauer Minimierung

<i>SubLim</i>	Genutzte Bereichsgröße des Grauwertprofils für die Subvoxelunterteilung
<i>SubRes</i>	Auflösung der Unterteilung des Grauwertprofils für die Subvoxelsuche
<i>MaxItSubVox</i>	Maximale Anzahl an Iterationen bei subvoxelgenauer Minimierung
<i>MinMovePntsSubVox</i>	Minimale Anzahl der Positionsvariationen im aktuellen Iterationsschritt bei subvoxelgenauer Minimierung
$u_{SubVox}$	Gewicht für Grauwertenergie bei subvoxelgenauer Minimierung
$v_{SubVox}$	Gewicht für Krümmungsenergie bei subvoxelgenauer Minimierung

---

## B. Verwendete Datenstrukturen

### Oberfläche

Klassenvariablen Oberfläche:

```
class SurfaceData
{
...
double m_dResXY; // Auflösung Voxelmodells in X- und Y-Richtung
double m_dResZ; // Auflösung Voxelmodells in Z-Richtung
EMinParams m_eMinParams; // Eingabeparameter für Energieminimierung

int m_iGWSize; // Größe der GWprofile
BYTE* m_pGWProfiles; // Array der GWprofile (8 Bit)
float* m_pGWProfileLen; // Array der Abstände der Durchstoßpunkte
int* m_pGWProfilePos; // Array der akt. Pos. der Punkte im GWprofil
GWProfileAna* m_pGWProfilesAnaly; //Ergebnisse der Profilanalyse

VPTriangulation* pTriang; // Aktuelles Dreiecksnetz

VPEdge* m_pEdges; // Array der Kanten in pTriang
int m_iNbEdges; // Anzahl der Kanten

bool* m_bIsBorder; // Array: Ist Randpunkt? für jeden Punkt
int** pPntNeighbors; // Array aller Punkte mit ihrer Nachbarn
int* pNbNeighbours; // Array der Anzahl der Nachbarn pro Punkt
```

```
double m_dSubRes; // Sollauflösung für das Subvoxeling
double m_dSublim; // Sollbereich für das Subvoxeling
float* m_pGWSubProfiles; // Subvoxelprofile
```

```
...
};
```

Datenstruktur Triangulierung:

```
typedef struct _tagVPTriangulation
{
long nbPoints;          // Anzahl der Punkte
VPPoint* pPoints;      // Array der Punkte
VPPoint* pNormals;     // Array der Punktnormalen
long nbTriangles;      // Anzahl der Dreiecke
VPTriangle* pTriangles; // Array der Dreiecke
} VPTriangulation;
```

Datenstruktur Punkte:

```
typedef struct tagVPPoint
{
double p[3]; // 3D Punktkoordinaten
} VPPoint;
```

Datenstruktur Dreiecke:

```
typedef struct tagVPTriangle
{
unsigned int nodes[3]; //Indizes Punkte in pPoints
} VPTriangle;
```

Datenstruktur Kanten:

```
typedef struct VPEdge
{
int P1;    // Punkt 1
int P2;    // Punkt 2
int T1;    // Angrenzendes Dreieck 1
int T2;    // Angrenzendes Dreieck 1,
           // mit T2 < 0 -> Randkante
} VPEdge;
```

---

Datenstruktur Ergebnisse vorangestellter Profilanalyse:

```
typedef struct GWProfileAna
{
int MaxGWPos; // Index in GWProfil mit max. GW
int MinGWPos; // Index in GWProfil mit min. GW
int MaxEPos; // Index in GWProfil mit max. GWenergie
int MinEPos; // Index in GWProfil mit min. GWenergie

BYTE GWRight; // Dominanter GW im Profil rechte Seite
BYTE GWLeft; // Dominanter GW im Profil linke Seite
int midIdx; // Index der Position zwischen Bereichen

} GWProfileAna;
```

Datenstruktur Ergebnisse vorangestellter Profilanalyse:

```
typedef struct EMinParams
{
BYTE nomGW; // Nominaler Grauwert = 0 keine Beachtung,
// = 1 links von midIdx, = 2 rechts von midIdx,
// > 2 Schwellwert.
int nomGrad; // Nominaler Gradient = 0 keine Beachtung,
// = -1 max. Gradient, > 0 Wert für Sollgradient
float nomCurv; // Nominale Krümmung = 0 Flachheit,
// < 0 Sollkrümmung

}EMinParams;
```

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Extraktion von 3D-Oberflächen aus industriellen Computertomographiedaten. In diesem Zusammenhang wird ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht, regionsabhängig und an gegebene Mess- oder Prüfaufgaben angepasst Grenzflächen zu ermitteln.

ISBN 978-3-8396-0672-8



FRAUNHOFER VERLAG