

Anwendung computertomographischer Daten in Werkzeugen der Produktentwicklung

Von der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dirk Hofmann

geboren am 21. März 1981 in Karl-Marx-Stadt

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht

Tag der Einreichung: 30. Juli 2021

Tag der Verteidigung: 30. März 2022

Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit bei der Professur für Konstruktionstechnik / CAD (seit Juni 2021, Professur für Virtuelle Produktentwicklung) an der Technischen Universität Dresden in den Jahren zwischen 2016-2021 entstanden. Dazu möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die diesen Prozess begleitet haben.

Meinem Erstgutachter und langjährigen Lehrstuhlinhaber, Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer, danke ich für die Möglichkeit diese Arbeit im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit anzufertigen. Gleichwohl danke ich Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah, Lehrstuhlinhaber der Professur für Produktentstehungsprozesse und Datenmanagement an der Universität Duisburg-Essen, für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein großer Dank gebührt Frau Dr.-Ing. habil. Christine Schöne, die viele Jahre als Forschungsgruppenleiterin die Inhalte meiner wissenschaftlichen Arbeit begleitet, mich unterstützt und die Gruppe stets gefördert hat. Daneben gilt mein besonderer Dank, den Doktoren Stefan Holtzhausen und Philipp Sembdner. Sie haben unzählige Sitzungen mit mir verbracht, um meine Ideen und Vorschläge zur inhaltlichen Gestaltung dieser Arbeit konstruktiv zu kritisieren und mich gleichzeitig immer wieder zu bestärken und zu motivieren, das Ziel niemals aus den Augen zu verlieren.

Zudem danke ich allen Kolleginnen und Kollegen der Professur Konstruktionstechnik / CAD. Es war stets ein sehr angenehmes Arbeitsumfeld. Ich habe mich stets nicht nur als Kollege, sondern als Mensch willkommen und geschätzt gefühlt.

Die wissenschaftlichen Arbeiten und Ausarbeitungen meiner ehemaligen Kollegen und vielen Studenten, haben essentiell dazu beigetragen, diese Arbeit zu dem zu machen, wie sie auf den folgenden Seiten vorliegt. Jeden einzeln zu nennen, würde dabei den Rahmen dieser Danksagung übersteigen. Jedoch sind deren Beiträge an den entsprechenden Stellen in dieser Arbeit referenziert sowie im Literaturverzeichnis im Sinne einer fundierten wissenschaftlichen Arbeit dokumentiert.

Meinem Nachbarn und Freund, Dr. med. Oliver Wolfram, danke ich, für die vielen gemeinsamen Stunden und die Diskussionen am Küchentisch, die zur inhaltlichen und sprachlichen Konsistenz dieser Arbeit beigetragen haben.

In jeder Phase meines Lebens konnte und kann ich mir der Unterstützung meiner Eltern, Christa und Dietmar, sowie meines Bruders, Mathias, sicher sein. Nicht zuletzt haben sie die Werte und Eigenschaften geprägt, die mich durch das Leben tragen und mich auch seine Herausforderungen bewältigen lassen. Gleichzeitig will ich meiner zweiten Familie, Uwe und Margita, für die kontinuierliche Unterstützung durch diese Zeit hindurch danken.

Ebenso wichtig wie die Familie sind gute Freunde! Diesen will ich nicht nur für die Ablenkung und die Unterstützung danken, sondern auch für die fortwährende Motivation, selbst bei kleinen Misserfolgen immer noch das Positive sehen und stets an das Ziel zu glauben und darauf hinzuarbeiten. Danke Euch allen! Besonderer Dank geht an Thomas und Isabell, an René und Claudia sowie Laura und an Dich, Stephan.

Den größten Dank will ich meiner Lebenspartnerin, Romy sagen, für die Fürsorge und Geduld, die sie aufgebracht hat, „um nur noch kurz etwas für diese Arbeit machen zu können.“

Allen Projektpartnern danke ich ebenfalls für die jahrelange Zusammenarbeit. Insbesondere den Staatlichen Kunstsammlungen Dresden für die Nutzung des Chronometers No. 8 sowie auch den Kollegen des Fraunhofer IWU für die Validierung des Demonstrators anhand des Werkzeugeinsatzes.

Dresden, im Mai 2022

Dirk Hofmann

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielstellung	4
1.4 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Technik	6
2.1 CT-Daten und deren Weiterverarbeitung	6
2.1.1 Allgemeines	6
2.1.2 Datenstruktur und Abbildungseigenschaften	7
2.1.3 Visualisierungsformen	10
2.1.4 Repräsentationsformen und Datenformate	12
2.1.5 Segmentierungsverfahren	14
2.1.6 Bestimmung charakteristischer Objektmerkmale	16
2.2 Methoden und Werkzeuge der Konstruktion	20
2.2.1 Übersicht	20
2.2.2 Modellierung auf Basis diskreter Oberflächen	22
2.2.3 Flächenrückführung	23
2.2.4 Direkte und parametrische Modellierung	24
2.2.5 Modellierung mit Bilddaten	26
2.3 Prozessuale und technische Analyse	28
3 Computertomographische Daten in der CAD-Umgebung	35
3.1 Das Konzept	35
3.1.1 Definition der Rahmenbedingungen	35
3.1.2 Anforderungen an die Prozesskette	36
3.1.3 Objektinformationen aus CT-Daten	37
3.1.4 Voraussetzungen in CAD-Systemen	39
3.2 Der Entwurf des Gesamtprozesses	40
3.3 Die Datenvorbereitung	43
3.3.1 Eingangsinformationen und Visualisierungsformen	43

3.3.2	Ausrichtung und Registrierung	46
3.3.3	Eingrenzen des Betrachtungsbereiches	51
3.4	Das Prinzip der Datenüberführung und Interpretation	56
3.5	Die Kommunikations- und Interaktionsebene.....	61
3.5.1	Methodenbeschreibung	61
3.5.2	Ergänzende Schnittansichten	64
3.5.3	Erstellen eines Freiformschnittes.....	67
3.5.4	Kontur- und Geometrieableitung.....	69
3.5.5	Partiell oberflächenbasierte Modellerstellung	78
4	Applikation und exemplarische Anwendung.....	85
4.1	Technische Realisierung	85
4.2	Beschreibung der Systemumgebung	87
4.3	Neukonstruktion eines individuellen Schädelimplantats	89
4.3.1	Anatomische Grundlagen	89
4.3.2	Problemstellung und Analyse	90
4.3.3	Modellierung	91
4.4	Anpassungskonstruktion des Räderwerkes einer historischen Taschenuhr	100
4.4.1	Technische Grundlagen.....	101
4.4.2	Problemstellung und Analyse	102
4.4.3	Modellierung	103
4.5	Auswertung	105
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	111
5.1	Zusammenfassung	111
5.2	Ausblick	113
	Literaturverzeichnis.....	115
	Abbildungsverzeichnis.....	126
	Tabellenverzeichnis.....	130
	Anlagen	131

Abkürzungsverzeichnis

2 ^x	Kennzeichnung für die pro Bildpunkt gemessenen Signale in 2 ^x Abstufungen (X = Grauwerttiefe eines Bildes in Bit)
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
4D-CT	Vierdimensionale Computertomographie
API	Application Program Interface (dt.: Programmierschnittstelle)
B-Spline	Beziér-Spline (Beschreibungsform eines Polygonzuges als Kurve und Fläche)
BB	Bounding Box (Quader zur Eingrenzung von Bildinformationen)
BREP / B-Rep	Boundary Representation (dt.: Begrenzungsflächenmodell)
C#	C-Sharp (Objektorientierte Programmiersprache)
CAD	Computer Aided Design (dt.: Rechnergestützte Konstruktion)
CAE	Computer Aided Engineering (dt.: Virtuelle / Rechnergestützte Produktentwicklung)
CFD	Computational Fluid Dynamics (dt.: Numerische Strömungsmechanik - Numerisches Berechnungsverfahren)
CLI	Common Language Infrastructure (Datenformat)
CT	Röntgen-Computertomographie, kurz: Computertomographie
CTinA	CT-Daten in Produktentwicklungs-Anwendungen (Software-Prototyp)
DICOM®	Digital Imaging and Communications in Medicine (dt.: Digitale Bildverarbeitung und Kommunikation in der Medizin)
DICONDE	Digital Imaging and Communications in Nondestructive Evaluation (dt.: Digitale Bildverarbeitung und Kommunikation bei der zerstörungsfreien Prüfung)
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Organisation)
DMU	Digital Mock-Up (dt.: Digitales Versuchsmodell - Numerisches Berechnungsverfahren)
DXF	Drawing Interchange File Format (Datenformat)
FEM	Finite Element Method (dt.: Finite-Element-Methode - Numerisches Berechnungsverfahren)
ICP	Iterative Closet Point Algorithmus (Mathematisches Verfahren)
iCT	Industrielle Computertomographie (Fachgebiet der zerstörungsfreien Prüfung)
IGES	Initial Graphics Exchange Specification (Datenformat)
IPT	Proprietäres Datenformat der Firma AUTODESK® im CAD-System INVENTOR®
IR	Implantat-Rohling
ISO	Internationale Organisation für Normung (Organisation)
JPEG	Joint Photographic Experts Group (Datenformat)
JT	Jupiter Tessellation (Datenformat)
k. A.	Keine Angabe

KI	Künstliche Intelligenz (Teilgebiet der Informatik)
MC	Marching Cubes Algorithmus (Mathematisches Verfahren)
MDR	Medical Device Regulation (dt.: EU-Medizinprodukte-Verordnung)
MKG	Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie (Medizinisches Fachgebiet)
MKS	Mehrkörpersimulation (Numerisches Berechnungsverfahren)
MPS	Mathematisch-Physikalischer Salon (Museum der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden)
MTF	Modulationstransferfunktion (Mathematisches Verfahren)
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline (dt.: Nicht-Uniforme Rationale B-Spline)
OBJ	Offenes Dateiformat für diskrete dreidimensionale Formen
PEEK	Polyetheretherketon (Thermoplastischer Kunststoff)
PNG	Portable Network Graphics (Datenformat)
PSF	Point Spread Function (dt.: Bildpunktfunktion - Mathematisches Verfahren)
px	Pixel (dt.: Bildpunkt / Bildelement)
RANSAC	Random Sample Consensus-Algorithmus (Mathematisches Verfahren)
RAW	Rohdatenformat (Datenformat)
RGBA	Bezeichnet die drei Farbkanäle eines Pixel (2D) / Voxel (3D) mit R - Rot, G - Grün, B - Blau sowie den Alphakanal A für die Transparenz
ROI	Region of Interest (dt.: Interessierender Bereich)
RPS	Referenzpunktsystem (Element zur definierten Ausrichtung)
SI	Système International d' Unités (dt.: Internationales Einheitensystem)
SLIC	Simple Linear Iterative Clustering Algorithmus (Mathematisches Verfahren)
SNR	Signal Noise Ratio (dt.: Signal-Rausch-Verhältnis - Mathematisches Verfahren)
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data (Datenformat)
STL	Surface Tessellation Language (Datenformat)
TIFF	Tagged Image File Format (Datenformat)
TXT	Textdatei (Datenformat)
VB	Visual Basic (Objektorientierte Programmiersprache)
VBA	Visual Basic for Application (VB-Skriptsprache)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Organisation)
vs.	versus
XML	Extensible Markup Language (Datenformat)
z. B.	Zum Beispiel: Dahinter stehen exemplarische Vertreter einzelner Verfahren, Technologien oder Softwaresysteme. Diese wurden zufällig, jedoch anforderungskonform ausgewählt und erheben keinen Anspruch auf Exklusivität und Vollständigkeit.
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung (Industrielles Fachgebiet)

Symbolverzeichnis

#	Doppelkreuz: Variante / Nummer
>	Größer als
v	Junktoren: „oder“
\bar{P}	Mittlerer Grauwert
$\hat{\sigma}^2$	Bildpunktrauschen
A bis J	Zufällige Punkte einer Punktmenge
BK _I , BK _A	Bergrenzungs-Kurven - im inneren (I) / äußeren (A) Randbereich
C	Kontrast
C ₁ bis C ₅	Qualitätsabstufungen zur Klassifikation des Kontrastes
C _{Mi}	Methoden zur Beeinflussung des Kontrastes
d	Durchmesser in mm
D1, D2	Dreieckskonstellationen als Ergebnis der Triangulation beim MC
e _{mn}	Interpolierter Punkt auf einer Kante zwischen zwei Eckpunkten eines Voxel innerhalb des R ³ (Sonderform: e0 / e1 - exemplarische Interpolation entlang der Y-Achse)
E _i	Referenzebene zur Definition objektbeschreibender Merkmale
EP _i	Referenzpunkte zur Definition einer Referenzebene E _i
G _i	Grauwert
G _{Luft}	Exemplarische Grauwertkennzeichnung für Luft
G _{Objekt}	Exemplarische Grauwertkennzeichnung für ein Objekt
G _U , G _O	Bezeichnung von Geraden, die eine untere und obere Bereichsgrenze festlegen
I _{HG}	Intensität des Hintergrundes (z.B. Luft)
I _O	Intensität eines Objektes
K _i	Kennzeichnung einer Konturform (z.B. Spline, Linie)
K _B	Bildstapelkoordinatensystem
K _G	Globales Koordinatensystem
K _O (Ist / Soll)	Objektkoordinatensystem - Ist- / Soll-Objekt
M	Mittelpunkt
MTF _{CT}	Modulationstransferfunktion für das Gesamtsystem CT
MTF _{Brennfleck}	Modulationstransferfunktion für den Brennfleck
MTF _{Fokuswanderung}	Modulationstransferfunktion für die Fokuswanderung
MTF _{Detektor}	Modulationstransferfunktion des Detektors
MTF _{Rekonstruktion}	Modulationstransferfunktion für die Rekonstruktion
OM ₁ , OM ₂	Partielles Oberflächenmodell - Bereichsbezeichnung

P_i	Pixelement innerhalb einer Schicht Z_i
P_1 bis P_4	Grenz- und Übergangspunkte einer zusammengesetzten Kontur K_i
PA	Panoramaschichtaufnahme
r	Radius in mm
R	Rauschen
R^3	Dreidimensionaler Raum
R_1 bis R_5	Qualitätsabstufungen zur Klassifikation des Rauschens
$RB_{I1,2}$; $RB_{A1,2}$	Randbereich (Innen / Außen) zur Definition eines OM_i
RE_i	Referenzebene für eine Schichtsequenz in der CAD-Umgebung
R_{Mi}	Methoden zur Beeinflussung des Rauchverhaltens
S	Schärfe
S_1 bis S_5	Qualitätsabstufungen zur Klassifikation der Schärfe
S_{Mi}	Methoden zur Beeinflussung der Schärfe
SNR_{CT}	Signal-Rausch-Verhältnis eines Auswertebereiches
SP_i	Stützpunkt beim Definieren einer beliebigen Kontur als Spline-Kurve
SW	Schwellwert zur Oberflächenbestimmung
V_i	Voxel einer Schichtbildsequenz Z_i
V_e	Bezeichnung eines interpolierten Punktes innerhalb eines Voxels V_i
V_1 bis V_8	Bezeichnung der Eckpunkte an einem Voxel V_i im R^3
X, Y, Z	Bezeichnung der Achsen des kartesischen Koordinatensystems im R^3
XY, XZ, YZ	Bezeichnung der Koordinatenebenen, die über die entsprechenden kartesischen Achsen gebildet werden
Z_A	Schichtdicke zwischen zwei Schichten Z_i und $Z_{i\pm 1}$
Z_i	Bezeichnung einer Schicht, einer Schichtbildsequenz oder eines Schnittbildes aus einem Voxelvolumen
Z_{i+j}	Originäre Schichtsequenz / Voxelvolumen

Indices

i	Zählvariable für ein definiertes Element ($i \in +Z$)
j	Zählvariable für eine endliche Zahl von Elementen ($j \in +Z$)
m	Basispunkt für eine Interpolation innerhalb eines Voxel ($n \in 1-8$)
n	Richtungspunkt für eine Interpolation innerhalb eines Voxel ($n \in 1-8$)

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Computertomographie (CT) ist eine im heutigen Alltag vollständig etablierte Röntgentechnologie zur Erfassung und Auswertung struktureller Patientendaten mit primär diagnostischem Ansatz [1]. Auch in nichtmedizinischen Bereichen, wie der Museologie und Archäologie sowie der Forst- und Waldwirtschaft oder beim Grenzschutz, wird diese Technologie in der Datenverarbeitung effektiv eingesetzt [2–6]. Darüber hinaus hat sich in den letzten Jahren die industrielle Computertomographie (iCT) zu einem zentralen Bestandteil der zerstörungsfreien Bauteilprüfung entwickelt [7, 8]. Hierbei bilden die Qualitätssicherung und die Erforschung neuer Fertigungstechnologien eine der zentralen Aufgaben [9, 10].

Der wesentliche Vorteil einer zerstörungsfreien computertomographischen Bauteilprüfung gegenüber anderen bildgebenden oder taktilen Verfahren besteht in einem Zugewinn an detaillierter dreidimensionaler Information [11]. Somit können auch komplexe, innere Strukturen der geprüften Bauteile erfasst und in ihren qualitativen und quantitativen Merkmalen visualisiert werden [12].

Heutzutage ist eine Nutzung computertomographischer Daten in der Produktentwicklung noch nicht uneingeschränkt möglich. Die in der Praxis aktuell etablierte Vorgehensweise ist ein mehrstufiger Transformationsprozess mit unterschiedlichen Software-Werkzeugen, deren Datenbasis ein diskretes Volumenmodell des erfassten Objektes ist. Die Aufgaben einer virtuellen Produktentwicklung (CAE¹) hingegen werden durch eine analytisch beschriebene dreidimensionale Modellstruktur bestimmt, die in der Konstruktion mit einem gängigen CAD²-System modelliert wird [13]. Diese dreidimensionale Struktur bildet die Grundlage, um parametrische Produktanpassungen schnell und flexibel ausführen zu können. Nachfolgend können dann weitere Untersuchungen zur Sicherung der geforderten Produkteigenschaften mit den CAE-Werkzeugen erfolgen [14]. Dazu zählen unter anderem verschiedene Simulationen (z.B. CFD³), Funktionsprüfungen (z.B. DMU⁴) sowie Festigkeitsberechnungen (z.B. FEM⁵). Allerdings sind CAD-Systeme und ihre Modellierkerne nicht geeignet, um diskrete Volumenmodelle oder besonders große diskrete Datenmengen abbilden zu können [14, 15].

¹ CAE: Computer-Aided Engineering

² CAD: Computer-Aided Design

³ CFD: Computational Fluid Dynamics

⁴ DMU: Digital Mock Up

⁵ FEM: Finite Element Method

Die zunehmende Komplexität virtueller Produktentwicklungen, wie der Einsatz neuer Technologien (z.B. KI⁶, Vernetzung) verdeutlichen den Bedarf an konsistenten Lösungen [13, 16]. Deshalb erfordert es auch eines durchgängig digitalen Prozesses zur direkten Anwendung computertomographischer Daten in CAE-Werkzeugen [17]. Dabei bildet das CAD-System die klassische Arbeitsumgebung des Konstrukteurs zum Erstellen mechanischer Bauteile.

Die gegenwärtige Herausforderung besteht somit darin, geeignete methodische Funktionselemente zur gezielten Nutzung computertomographischer Daten bereitzustellen [18]. Die Methoden dafür bieten systematische und universelle Lösungsansätze, deren praktische Umsetzung durch Werkzeuge der Produktentwicklung erfolgt. Dementsprechend sollen computertomographische Daten so bereitgestellt werden, dass diese ohne aufwändige Vor- und Nachbearbeitungsschritte verarbeitet werden können.

1.2 Problemstellung

Um die mittels Computertomographie entstandenen Daten mit den Werkzeugen der Produktentwicklung nutzen zu können, wird heutzutage allgemein die in Abbildung 1-1 dargestellte Prozesskette angewendet.

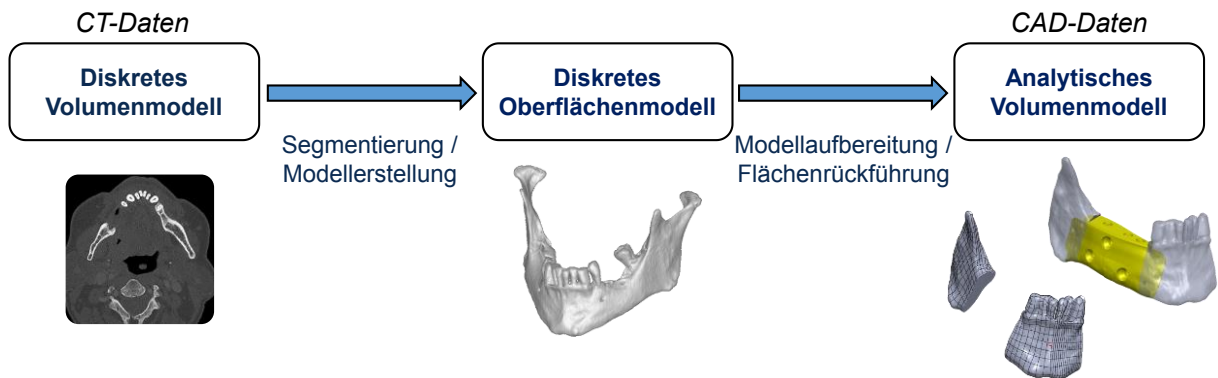


Abbildung 1-1: Prozesskette zur Modellerstellung aus CT-Daten am Beispiel eines Unterkieferknochens (Beispiel aus [18], Prozess aus [19, 20])

Nach der Digitalisierung liegt eine Schichtbildsequenz als diskretes Volumenmodell vor. Zur Generierung der Objektinformationen erfolgt eine Segmentierung, also eine dichte-basierte Bereichsauswahl. Daraus entsteht anschließend ein diskretes Oberflächenmodell, auch Polygonmodell genannt. Um das Polygonmodell für eine Neu- oder Änderungskonstruktion zu nutzen, muss über eine Flächenrückführung ein analytisches Volumenmodell erstellt werden. [19, 20]

Im Beispiel ist die knöcherne Struktur des Unterkiefers aus einem Computertomogramm des menschlichen Schädels zu rekonstruieren. In der sogenannten BASIS MANDIBULAE des Unterkiefers besteht ein lokal umschriebener knöcherner Defekt, der über ein individuell angepasstes Implantat ausgeglichen werden soll. Dazu erfolgt nach der Segmentierung des Unterkieferknochens eine Aufbereitung des entstandenen Polygonmodells. Bei diesem Schritt wird der erkrankte Bereich entfernt und nachfolgend eine homogene Oberflächenstruktur erstellt. Um

⁶ KI: Künstliche Intelligenz

das Polygonmodell für die Neukonstruktion eines Implantats nutzen zu können, wird über die bereits erwähnte Flächenrückführung das analytische Volumenmodell der entsprechenden Unterkieferbasis generiert. [18]

Die dargestellte Prozesskette zeigt ein insgesamt mehrstufiges Vorgehen mit einer vornehmlich sequenziellen Abfolge (Abbildung 1-2). Der Transformationsprozess vom diskreten zum analytischen Volumenmodell wird dabei neben der Modellumwandlung auch von einer Datenkonvertierung beeinflusst.

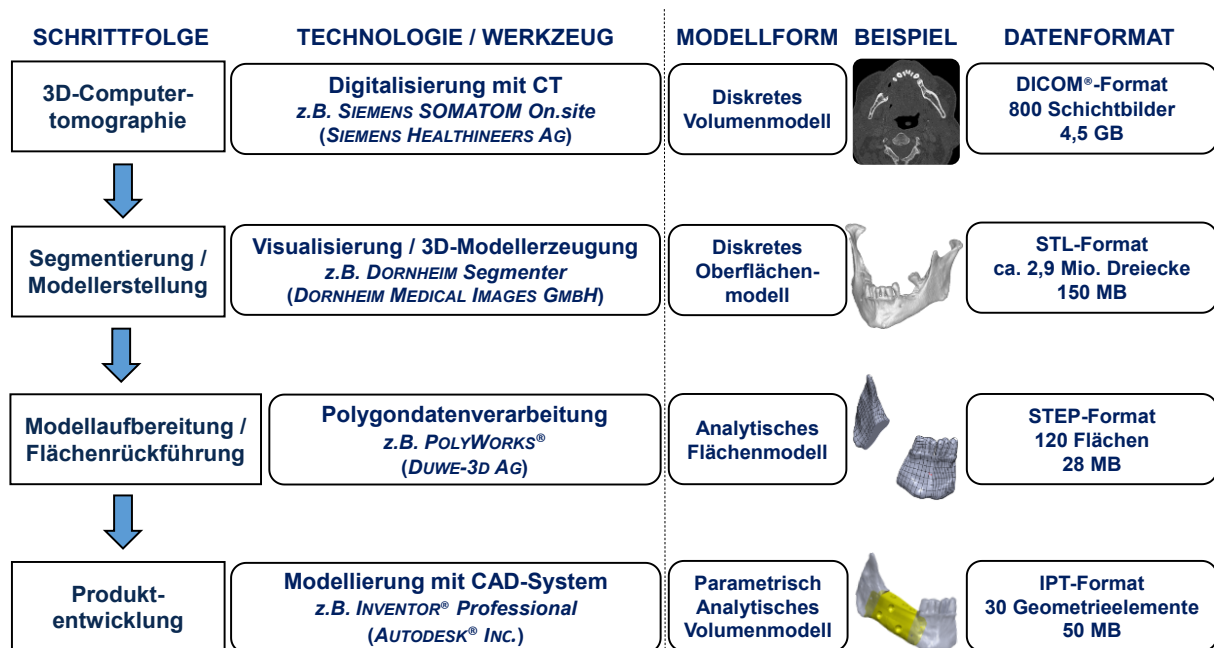


Abbildung 1-2: Prozesskette mit ausgewählten Beispielen der einzelnen Bestandteile [18–24]

Die Überführung der einzelnen Modellformen ist durch die vorhandenen Systemschnittstellen von einem relevanten Informations- und Genauigkeitsverlust geprägt. Zur Weiterverarbeitung erfolgt die Konvertierung in standardisierte oder industriell etablierte Datenformate. Gleichwohl stehen in CAD-Systemen keine geeigneten Funktionselemente für eine zielgerichtete Verwendung diskreter Volumen- und Oberflächenmodelle zur Verfügung. Eine Verarbeitung analytischer Flächenmodelle ist systemseitig zwar möglich, jedoch erfolgt dies mit erheblichem Mehraufwand. Zudem können über ausgewählte Datenformate einzelne Geometrielemente nicht in einer sequenziellen Konstruktionshistorie, dem Modellbaum hinterlegt werden [25]. Ebenso gibt es hierzu keine systematischen parametrischen Verknüpfungen (z.B. STEP⁷) [14]. Diese Charakteristika von CAD-Systemen und deren integrierte Datenstrukturen gestalten den Modellierungsprozess flexibler und schneller.

Insgesamt zeigt sich, dass es mit der bisher angewandten Prozesskette keine Möglichkeiten zur direkten Nutzung computertomographischer Daten in der Produktentwicklung gibt. Zudem existieren keine standardisierten Schnittstellen zur kontinuierlichen Übertragung der Daten in CAD- bzw. in CAE-Werkzeuge, was sich auch anhand von fehlenden funktionellen Eigen-

⁷ STEP: STANDARD FOR THE EXCHANGE OF PRODUCT MODEL DATA

schaften widerspiegelt. Aufgrund der primär auf analytischen Modellformen basierten Methodik, welche durch CAD-Systeme und weiterführend in der virtuellen Produktentwicklung Anwendung finden, liegt grundsätzlich ein systematisches Problem vor. Zur Verwendung computertomographischer Daten sollte es somit methodisch möglich sein, gezielt diskrete Volumenmodelle und somit die erforderlichen Objektinformationen direkt in Werkzeugen der Produktentwicklung anzuwenden.

1.3 Zielstellung

Computertomographisch erhobene Daten werden in der Produktentwicklung bisher über Analysen bei zerstörungsfreien Bauteilprüfungen und zur Ableitung patientenindividueller Modelldaten in der medizinischen Diagnostik verwendet. Um jedoch die CT-Daten in den Werkzeugen der Produktentwicklung nutzen zu können, sind aufwändige Vorbereitungsschritte erforderlich, die nur mit mehreren komplexen Softwaresystemen umsetzbar sind.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Prozess zu entwickeln, der computertomographische Daten direkt in Werkzeugen der Produktentwicklung anwendbar macht.

Der Nutzen dieses Prozesses soll dem Konstrukteur als vorrangigem Anwender zugutekommen. Die zu entwickelnde Prozesskette ist konstruktionsbegleitend bei Aufgabenstellungen einer Neu- und Änderungskonstruktion einzugliedern. Variantenkonstruktionen, als letzter Vertreter konstruktiver Aufgabenstellungen, variieren grundsätzlich die Parameter des vorliegenden virtuellen Modells [26]. Dafür sind in der Regel keine Informationen aus CT-Daten erforderlich. Innerhalb des Prozesses sollen die in den CT-Daten enthaltenen Objektinformationen gezielt für Konstruktionen verwendet werden. Demzufolge soll die Anwendung vorrangig mit dem täglichen Arbeitssystem des Konstrukteurs, dem CAD-System erfolgen. Grundlage dafür bilden ihre Systematik sowie die bereits etablierten Funktionselemente. Mit diesem Prozess kann der Anwender die für seine Aufgabe relevanten Daten und Informationen direkt aus den CT-Daten generieren und zielgerichtet nutzen. Darüber hinaus sollen zusätzliche Softwaresysteme sowie aufwendige Vor- und Nachbearbeitungsschritte entweder entfallen oder auf ein Minimum begrenzt werden. Dieser Ansatz geht mit einer Vermeidung unnötiger Konvertierungen und somit einer Reduzierung nachteiliger Informations- und Genauigkeitsverluste einher. Der Konstrukteur soll sich ausschließlich mit der Bearbeitung der vorliegenden Aufgabe auseinandersetzen. Dieser Prozess soll anwenderfreundlich, variabel und interaktiv mit den prinzipiellen Abläufen der Produktentwicklung verbunden sein.

Um während des gesamten Konstruktionsprozesses alle in den CT-Daten enthaltenen Informationen nutzen zu können, soll ein kontinuierlicher Zugriff auf die erfassten Datenoriginale gewährleistet sein. Dafür ist ein Konzept zu entwickeln, mit dem computertomographische Daten durchgehend in CAD-Systemen genutzt werden können. Ferner müssen Methoden entwickelt werden, um eine direkte Verarbeitung der CT-Daten zu ermöglichen. Damit sind Funktionsbausteine zur Umsetzung der Methoden erforderlich, die sich an den etablierten Arbeitsweisen des Konstrukteurs orientieren. Diese sollen mit Hilfe eines systemübergreifenden Ansatzes für die verfügbaren Werkzeuge übertragbar sein, um CT-Daten in optional verschiedenen CAD-Systemen und entsprechenden CAE-Werkzeugen der Produktentwicklung nutzen zu können.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung wird in *Kapitel 2* zunächst ein Überblick zum Stand der Technik gegeben. Dies beinhaltet Ausführungen zu Eigenschaften computertomographischer Daten und ihrer Bearbeitungsmöglichkeiten. Im zweiten Teil des Kapitels werden die aktuellen Methoden zur Nutzung von CT-Daten beziehungsweise der in den Daten enthaltenen Objektinformationen in CAD-Systemen charakterisiert. Abschließend wird eine prozessuale und technische Analyse der vorgestellten Methoden anhand ausgewählter kommerzieller Software-Werkzeuge sowie an einem exemplarischen Beispiel gegeben. Den Kern dieser Arbeit bildet *Kapitel 3* mit der Konzeption eines Prozesses zur direkten Nutzung computertomographischer Daten in CAD-Umgebungen. Um einen Prozess zu erstellen, müssen zunächst Randbedingungen eingegrenzt und entsprechende Anforderungen an den zukünftigen Prozess abgeleitet werden. Anschließend werden die vorhandenen Voraussetzungen betrachtet. Dies geschieht einerseits durch eine Analyse der computertomographischen Datenstruktur und den daraus ableitbaren Objekteigenschaften und andererseits über die Charakterisierung der Anforderungen und Eigenschaften von CAD-Systemen. Aus diesen Erkenntnissen werden Synergien abgeleitet, um letztlich einen kontinuierlichen Prozess zu realisieren. Dieser Gesamtprozess wird anschließend entworfen sowie in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert und exemplarisch unterlegt. Um gezielt die erforderlichen Objektinformationen aus den CT-Daten zu generieren, wird zudem ein Interaktionskonzept erarbeitet. Dafür werden zunächst die methodischen Grundlagen geschaffen, welche anschließend an exemplarischen Objektinformationen funktionell erläutert werden. In *Kapitel 4* wird die in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise an zwei Beispielen, einem medizinischen und einem technischen angewendet. Dafür werden einleitend die technischen Randbedingungen beschrieben und die Systemumgebung der prototypischen Umsetzung definiert. Anschließend erfolgen eine Erläuterung der Lösungsmethodik und eine Bewertung der Ergebnisse. *Kapitel 5* fasst alle Ergebnisse der Arbeit zusammen und erstellt einen Ausblick zu potenziellen Forschungsaspekten. Abbildung 1-3 zeigt die Struktur der Arbeit.

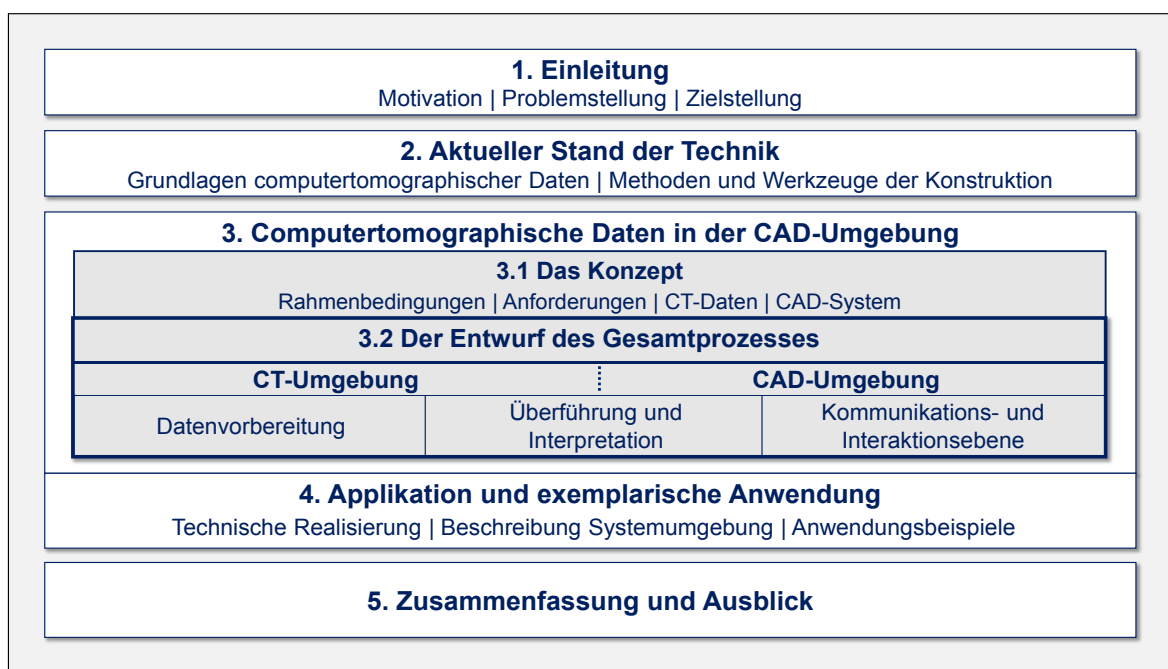


Abbildung 1-3: Aufbau und Inhalte der Arbeit

2 Stand der Technik

2.1 CT-Daten und deren Weiterverarbeitung

2.1.1 Allgemeines

Die Röntgen-Computertomographie (CT) ist ein bildgebendes Digitalisierverfahren und basiert auf der Nutzung von Röntgenstrahlung sowie der mathematischen Theorie von JOHANN RADON, „zur Errechnung der Materialeigenschaft in einer Objektschicht“ [27, 28].

In Abbildung 2-1 ist der Aufbau eines industriellen 3D-Computertomographen dargestellt. Dieser besteht aus einer Röntgenquelle, einem Detektor, sowie einen Tisch, auf dem in der Anwendung das zu digitalisierende Objekt oder bei medizinischen Untersuchungen der Patient positioniert ist. Neben verschiedenen Aufbauten und Anforderungen an die zu erfassenden Objekte beider Einsatzbereiche besteht der Hauptunterschied darin, dass beim industriellen Computertomographen, Röntgenquelle und Detektor während der Erfassung fest zum rotierenden Objekt angeordnet sind, wohingegen sie sich im medizinischen Bereich um den ruhenden Patienten drehen. [29]

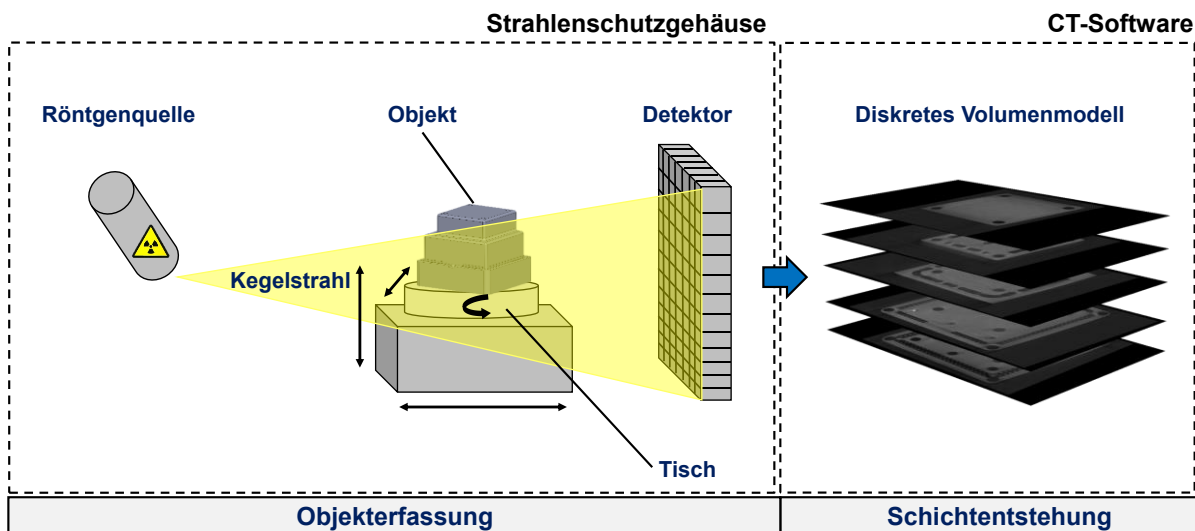


Abbildung 2-1: Aufbau eines 3D-iCT - Objekterfassung (links), Schichtbildentstehung (rechts)
(Nach [30])

Bei der Digitalisierung gelangen Röntgenstrahlen durch das Objekt auf den Detektor. Aufgrund unterschiedlicher Materialdichten und Objektformen werden die Strahlen gestreut, ungleich stark absorbiert und dadurch geschwächt auf dem Detektor als Intensitätsprofil abgebildet (Abbildung 2-1, links). Nach KALENDER besteht „das Prinzip der Computertomographie darin,

die räumliche Verteilung einer physikalischen Eigenschaft des zu untersuchenden Objektes aus unterschiedlichen Richtungen zu messen und daraus überlagerungsfreie Bilder zu errechnen“ [28]. Um somit ein dreidimensionales Abbild zu erhalten, wird das Objekt schrittweise gedreht und weitere Aufnahmen werden aus vordefinierten Drehlagen erstellt [29]. Aus diesem Schwächungsprofil von Messdaten werden in einem weiteren Schritt durch mathematische Rekonstruktionsmethoden wie der RADON-Transformation, zweidimensionale Schichtdatenabbildungen des Objektes erzeugt (Abbildung 2-1, rechts) [28, 31]. Diese werden in der Regel als Graustufenbilder entweder in einem standardisierten oder einem etablierten Bilddatenformat gespeichert. Das Ergebnis der Digitalisierung ist eine Schichtbildsequenz als diskretes Volumenmodell, welches Informationen über die räumliche Struktur der erfassten Objekte enthält [32]. Abhängig von den gewählten CT-Aufnahmebedingungen kann eine Schichtbildsequenz einige hundert bis wenige tausend Schichten betragen [29].

2.1.2 Datenstruktur und Abbildungseigenschaften

Abbildung 2-2 zeigt den Aufbau und die Bestandteile einer computertomographischen Datenstruktur. Mit dem aus Abbildung 2-1 dargestellten Datensatz eines Werkzeugeinsatzes wird ein exemplarisches Beispiel verwendet, welches schematisch die einzelnen Bestandteile auf der rechten Seite unterlegt. Dabei wird verdeutlicht, dass die erfassten Daten in Form eines diskreten Volumenmodells vorliegen. Es besteht aus einer definierten Anzahl an Schichtdatenabbildungen (Z_1-Z_i), die über dreidimensionale Dichteinformationen ein Körpervolumen (Diskretes Oberflächenmodell) repräsentieren. [32, 33]

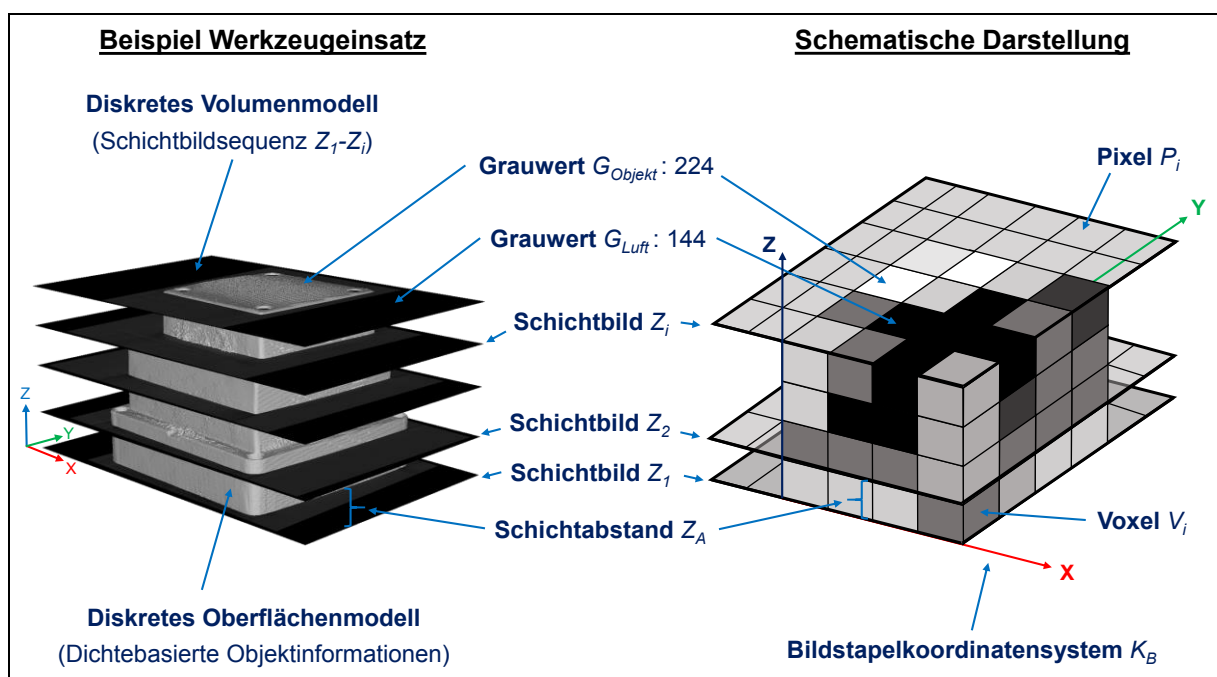


Abbildung 2-2: Computertomographische Daten und ihre Eigenschaften

Eine einzelne Schicht (Z_i) besteht aus einer Matrix von Pixelelementen (P_i), deren Größe die Anzahl aller Pixel in zwei Dimensionen (x/y) definiert. Außerdem ist jede Schicht über ein

Bildstapelkoordinatensystem (K_B) mit einer festen Position und Richtung innerhalb des diskreten Volumenmodells gekennzeichnet. Der Abstand der einzelnen Schichten wird über die sogenannte Schichtdicke (Z_A) bestimmt, welche bei der Erfassung festgelegt wird. Dadurch wird jeder Pixel in ein Volumenelement, das sogenannte Voxel (V_i) überführt. Nach HANDELS wird somit das diskrete Volumenmodell alternativ auch als Voxelvolumen bezeichnet. [32, 33]

Die einzelnen Schichtbilder werden in einem Bilddatenformat gespeichert, was primär zweidimensionale Informationen abbilden kann. Um die räumlichen Eigenschaften einer Schichtbildsequenz nutzen zu können, werden zusätzliche Informationen aus den Metadaten, wie die Größe und den Grauwert der einzelnen Voxel benötigt. Die Größe kann sowohl isotrop als auch anisotrop sein und ist über drei kartesische Dimensionen gekennzeichnet. Jedes Voxel verfügt über einen Grauwert⁸ (G_i). Dieser Wert ist ein Maß für die Differenz zwischen ausgestrahlter und absorbiertes Strahlung und bildet lokal die gemessenen Intensitäten ab. Grauwerte repräsentieren folglich unterschiedliche Dichtebereiche der erfassten Objekte. [32, 33]

Die Anzahl der unterschiedlichen Grauwerte in einer Bildmatrix wird durch die Grauwerttiefe bestimmt. Diese entsprechen der Menge aller Grauwertabstufungen. Beinhaltet ein Voxelvolumen beispielsweise eine Grauwerttiefe von 8 Bit, kann jedes Voxel einen Grauwert im Wertebereich von 0 bis 255 Grauwerten annehmen. Ein medizinisches Computertomogramm verfügt üblicherweise über eine Grauwerttiefe von 12 Bit und entspricht demnach 4096 Abstufungen [32]. Bei industriellen Anwendungen werden aufgrund gesteigerter Anforderungen an die Abbildungsgenauigkeit noch höhere Grauwertbereiche verwendet [30, 34]. Grundsätzlich gilt jedoch, je geringer die Grauwerttiefe, desto weniger Speicherbedarf ist erforderlich.

Um CT-Daten und deren zugrundeliegende Abbildungseigenschaften besser charakterisieren zu können, werden diese nachfolgend betrachtet.

Computertomographische Daten werden üblicherweise im DICOM[®]- (DIGITAL IMAGING AND COMMUNICATIONS IN MEDICINE) Format als Schichtbildsequenzen gespeichert. DICOM[®] ist ein offener Standard zur Speicherung und zum Austausch medizinischer Bilddaten und bildbezogener Informationen [35, 36]. Neben den Bildinformationen wie der Voxelgröße oder der Grauwerttiefe werden darüber hinaus weitere Informationen zum Patienten und zur Aufnahme gespeichert. Diese befinden sich als Metadaten in einem sogenannten Bildheader (DICOM-DIRECTORY) und sind in verschiedenen MODULEN genau kategorisiert (Abbildung 2-3) [36].

Neben DICOM[®] im medizinischen Bereich werden auch andere etablierte Bilddatenformate, wie RAW (ROHDATENFORMAT), TIFF (TAGGED IMAGE FILE FORMAT) oder das standardisierte PNG- (PORTABLE NETWORK GRAPHICS) Format verwendet [37]. Dabei werden die Schichten als einzelne Bilddateien mit zweidimensionalen Informationen gespeichert. Diese sind jedoch nicht an eine semantische Konvention beim Datentransfer gebunden. Auch verfügen sie nicht über alle bei DICOM[®]-Formaten üblichen Informationen. Zusätzliche Metadaten, wie etwa der Schichtbildabstand oder die Pixelgröße, die beim DICOM[®] über den Header übertragen wer-

⁸ Grauwerte: Sind die pro Bildpunkt gemessenen Signale in 2^X Abstufungen (X = Grauwerttiefe des Bildes in Bit) [32].

den und für Initialisierung der dreidimensionalen Informationen wesentlich sind, müssen in einer separaten Metadatei hinterlegt werden.

Daten Tag	Bezeichnung Attribut Name	Inhalt Value
Bildzusatzinformationen		
Image Pixel / Plane Module - Bildinformationen		
0028,0010	Rows	512
0028,0011	Columns	512
0028,0100	Bits Allocated	16
0028,0030	Pixel Spacing	0.062064\ 0.062064
General Study Module Informationen zur Untersuchung		
0008,0020	Study Date	20190516
General Series Module Informationen zum Verfahren und Gerät		
0008,0060	Modality	CT
Patient Module - Patienteninformation		
0010,0010	Patient Name	Muster, Max

Abbildung 2-3: Einzelne Schicht einer Schichtbildsequenz mit beispielhafter Struktur der Metadaten (Nach [32])

Mit DICONDE (DIGITAL IMAGING AND COMMUNICATION IN NON DESTRUCTIVE EVALUATION) existiert ebenfalls eine DICOM®-basierte industriennahe Datenbeschreibung [38, 39]. Dieses herstellerunabhängige Dateiformat wird vor allem für zerstörungsfreie bildgebende Prüfverfahren angewandt [40, 41]. Wesentlicher Unterschied zu DICOM® ist der Ersatz medizinischer Daten durch prüfprozessbezogene Informationen in den Metadaten. Der grundlegende Aufbau von DICONDE entspricht dem aktuellen DICOM® 3.0 Standard [42]. Ähnlich wie bei DICOM® können die Metadaten auch hier weitere Hinweise zur Charakterisierung erfasster Objekte geben. Dies können beispielsweise Objekt-assoziierte Sach- und Verwaltungsnummern sein.

Zusammenfassend können CT-Daten wie folgt charakterisiert werden:

*Als **CT-Daten** werden zusammenhängende Schichtbildsequenzen sowie deren bildbasierte Metadaten zur Verarbeitung der in den Daten enthaltenen Objektinformationen bezeichnet. Die Grundlage bildet das diskrete Volumenmodell, welches dichtebasierte räumliche Informationen über die erfassten Objekte enthält.*

Um die Qualität der Daten einzuschätzen, ist es erforderlich eventuell auftretende Einflussgrößen zu identifizieren. In Abbildung 2-4 werden anhand eines ICHIKAWA-Diagramms gerätetechnische und objektbezogene Parameter nach ISO 15708 und VDI 2630 dementsprechend klassifiziert [19, 43]. Dabei beeinflussen vor allem die einzelnen Hardwarekomponenten sowie die Gestalt und die Eigenschaften des Objektes energieabhängige Abbildungsfehler. Diese führen zu klassischen Fehlern (Artefakten) in den Schichtbildsequenzen wie etwa Streustrahlung oder Strahlaufhärtung [11, 29, 44]. Daneben gibt es systemunabhängige Ursachen, wie den Einfluss des Bedieners oder wechselnde Umgebungsbedingungen, die ebenfalls zu Artefakten führen können [19, 31, 45].

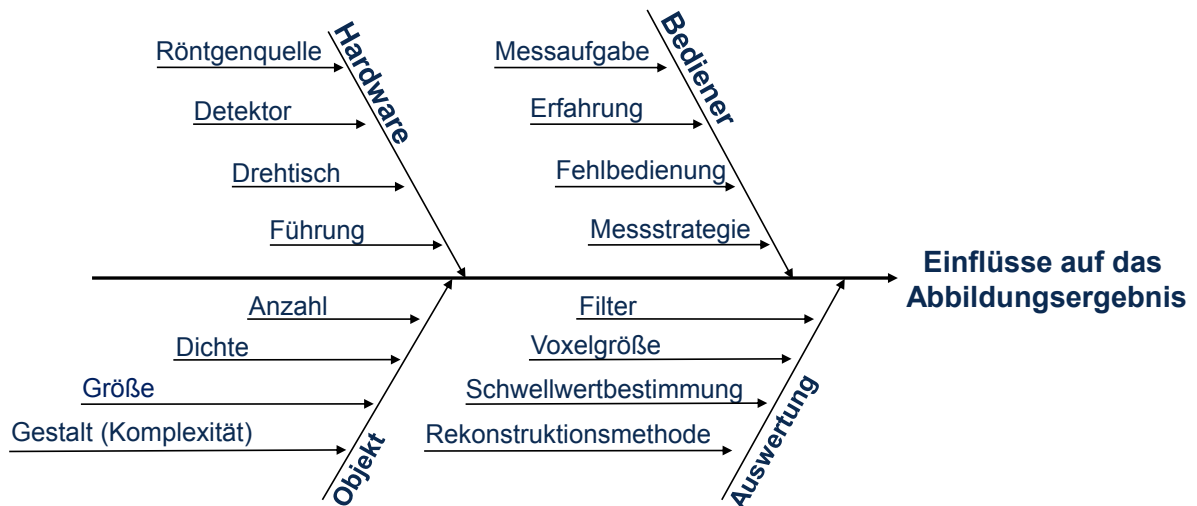


Abbildung 2-4: Klassifikation und beispielhafte Auswahl von Einflussgrößen auf das Abbildungsergebnis (Nach [19, 43])

Abbildung 2-5 zeigt zwei ausgewählte Beispiele für Fehler in Ergebnisbildern.

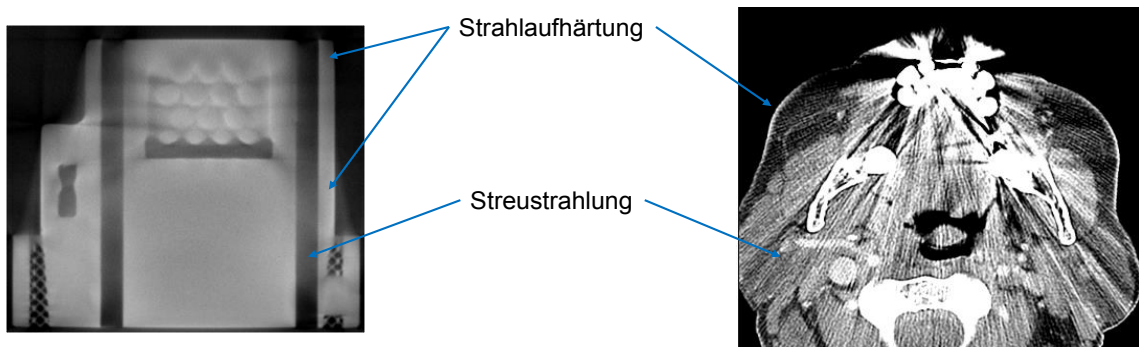


Abbildung 2-5: Schichtbilder eines industriellen (links) und eines medizinischen (rechts) computertomographischen Datensatzes mit Artefakten

Das Abbildungsergebnis eines medizinischen oder industriellen Computertomogramm ist also immer von verschiedenen Faktoren abhängig, die sich in Ihrer Intensität auch gegenseitig beeinflussen können [31, 44, 45]. Grundsätzlich wird die Abbildungsqualität durch den Kontrast, das Rauschen und die Auflösung charakterisiert [19, 29, 46].

2.1.3 Visualisierungsformen

Nach HANDELS sind „durch die computertomographische Bildgebung sogenannte 3D-Bildfolgen verfügbar geworden“ [32]. Zur Visualisierung und Analyse ist damit eine sequenzielle oder schichtweise Betrachtung der gespeicherten 2D-Bilder entlang einer festgesetzten Achse möglich. Typischerweise erfolgt die Visualisierung der erfassten Schichtbilder in den drei kartesischen Koordinatenebenen (Abbildung 2-6). Grundsätzlich kann jedoch eine Analyse in beliebiger Richtung erfolgen. [47]

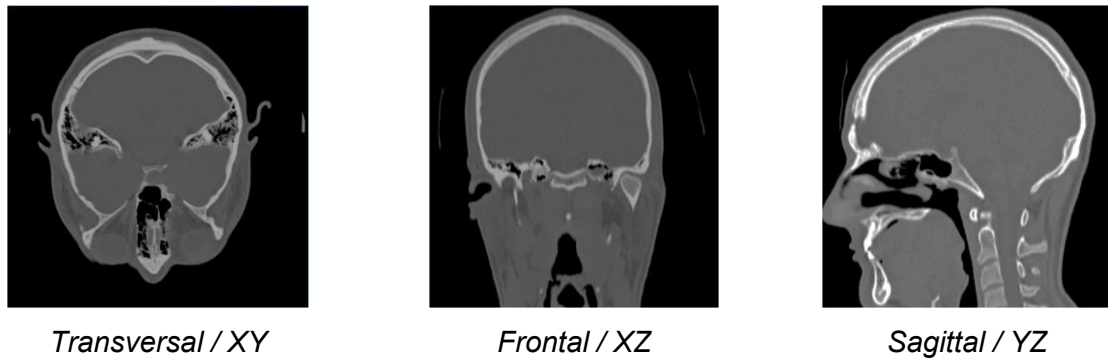


Abbildung 2-6: Darstellung eines menschlichen Schädels aus drei kartesischen Koordinatenebenen in anatomischer Schnitfführung (Nach [48])

Darüber hinaus ist durch die computertomographische Datenstruktur eine dreidimensionale Visualisierung möglich, so dass eine räumliche Anordnung und Struktur der erfassten Objekte erkennbar wird [32]. Dazu existieren mit volumen- und oberflächenbasierten Verfahren zwei Formen, die wiederum in jeweils direkte und indirekte Verfahren eingeteilt werden können.

Direkte Verfahren generieren eine 3D-Visualisierung unmittelbar aus dem computertomographischen Daten. Dabei erfolgt eine volumenbasierte Betrachtung in Form einzelner Quader der abgebildeten Objekte. Das Ergebnis enthält die entsprechenden Positionsdaten und ihrer Grauwerte (Abbildung 2-2). [49]

Oberflächenbasierte Verfahren werden auch als indirekte Visualisierung bezeichnet. Sie erzeugen temporär ein diskretes Oberflächenmodell. Im Gegensatz zu den direkten Verfahren können sie neben der Visualisierung auch für andere Anwendungen wie beispielsweise zur Modellierung (Abschnitt 2.2.2) oder zur Qualitätssicherung genutzt werden [50].

Abbildung 2-7 zeigt am Beispiel eines menschlichen Schädels die Unterschiede beider Verfahren. Die indirekte Oberflächenbestimmung resultiert dabei in einer dichtebasierten Schädelknochendarstellung. Dabei repräsentiert ein Grauwert lediglich einen Dichtebereich. In der Abbildung entspricht der definierte Grauwert dem der Dichte des Schädelknochens. Beim direkten Volumenrendering werden dagegen unterschiedliche Dichtespektren (z.B. Knochenstruktur, Weichteile) durch entsprechende Grauwerte abgebildet.

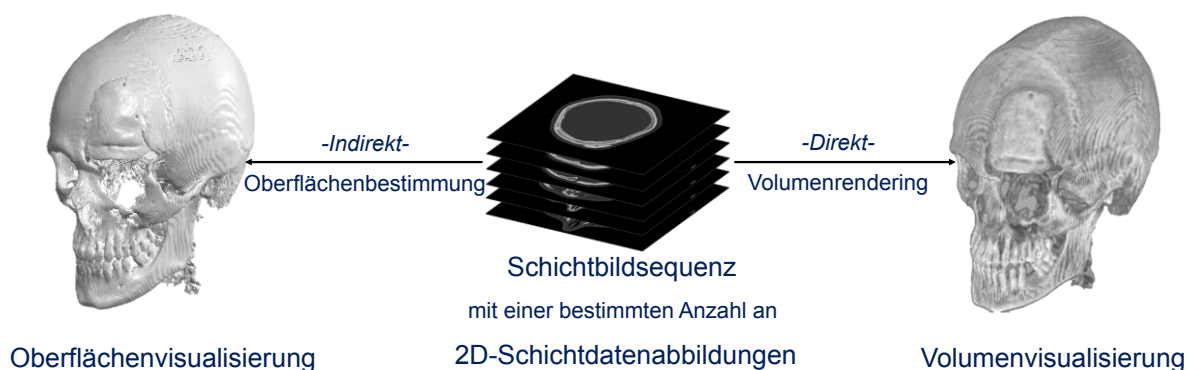


Abbildung 2-7: Indirekte und direkte Visualisierungsformen computertomographischer Daten

Tabelle 2-1 zeigt die Visualisierungsformen mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen.

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der Visualisierungsformen computertomographischer Daten [32, 49]

Formen	Oberflächen- Visualisierung	2D-Schichtdaten- Abbildung	Volumen- Visualisierung
Vorteile	Methodische Vielfalt an Oberflächenmodellen	Gute Kompatibilität mit Grafikanwendungen	Viele Grauwertintensitäten verfügbar
	Einfache Visualisierung	Alle Objektdichten in einer Schicht darstellbar	Individuell wählbare Schnittebenen
	Vielfältige Anwendungsbereiche	Ressourcenschonende Datenspeicherung	Keine Informationsverluste
Nachteile	Ein Grauwert bestimmt die Abbildungsqualität	Nur pixelbasierte Darstellung möglich	Aufwendige Verarbeitung
	Limitierte Darstellung allein der Oberflächen	Kein Zusammenhang zu anderen Schichten	Trotz detaillierter Visualisierung nur limitierte Bearbeitung möglich

2.1.4 Repräsentationsformen und Datenformate

Die Überführung von CT-Daten aus einem diskreten in ein analytisches Volumenmodell wird grundlegend über drei verschiedene Prozessketten realisiert. Dabei werden sowohl zwei- wie auch dreidimensionale Objektinformationen generiert, die von diskreter, analytischer und numerischer Form sein können. Die Abbildung der Objektinformationen erfolgt jeweils durch unterschiedliche Repräsentationsformen, die über etablierte oder standardisierte Datenformate beschrieben werden.

Eine Repräsentationsform beschreibt in dieser Arbeit einen definierten Zustand der Objektinformationen. Dies kann einerseits die Überführung in ein diskretes Oberflächenmodell oder in eine geometrisch diskrete oder analytische Form sein. Andererseits sind Merkmale, die Eigenschaften der Objekte abbilden und damit eine Gestalt oder Geometrie charakterisieren ebenfalls eine Repräsentationsform. Somit schließt die Begriffsbezeichnung auch die unterschiedlichen Visualisierungsformen mit ein.

Abbildung 2-8 zeigt vereinfacht alle drei Prozessfolgen mit ihren jeweiligen Repräsentationsformen. Dabei werden ausschließlich die Schrittfolgen zur Modellerstellung veranschaulicht.

Objektstrukturen werden nach der digitalen Bildverarbeitung als analytische Geometrieformen oder als diskrete Konturen abgeleitet. Diese Formen können unter anderen im DXF- (DRAWING INTERCHANGE FORMAT) Format als Vektorgrafik gespeichert werden [25]. Ihre Transformation in CAD-Daten geschieht beispielsweise über eine strukturelle Neukonstruktion (#1). Diskrete Oberflächenmodelle treten morphologisch als inhomogene Polygonnetze in Erscheinung und werden typischerweise im STL- (SURFACE TESSELATION LANGUAGE) Format gespeichert. Sie sind die rekonstruktive Basis für die Flächenrückführung und das analytische Volumenmodell.

Die zweite Prozesskette (#2) beschreibt dabei den bisher methodisch wie auch industriell etablierten Weg (Abschnitt 1.2). Objektmerkmale sind alle bildanalytisch erfassten Parameter wie etwa Längen- und Winkelmaße, Umfangslängen sowie auch Flächen- und Volumeninhalte. Ihre Überführung in das analytische Volumenmodell erfolgt zum Beispiel mittels Landmarken über eine Änderungskonstruktion (#3). Eine verbreitete Form der Übertragung ist die XML- (EXTENSIBLE MARKUP LANGUAGE) Auszeichnungssprache, zum Austausch prozessspezifischer Struktur- und Metadaten [18, 25].

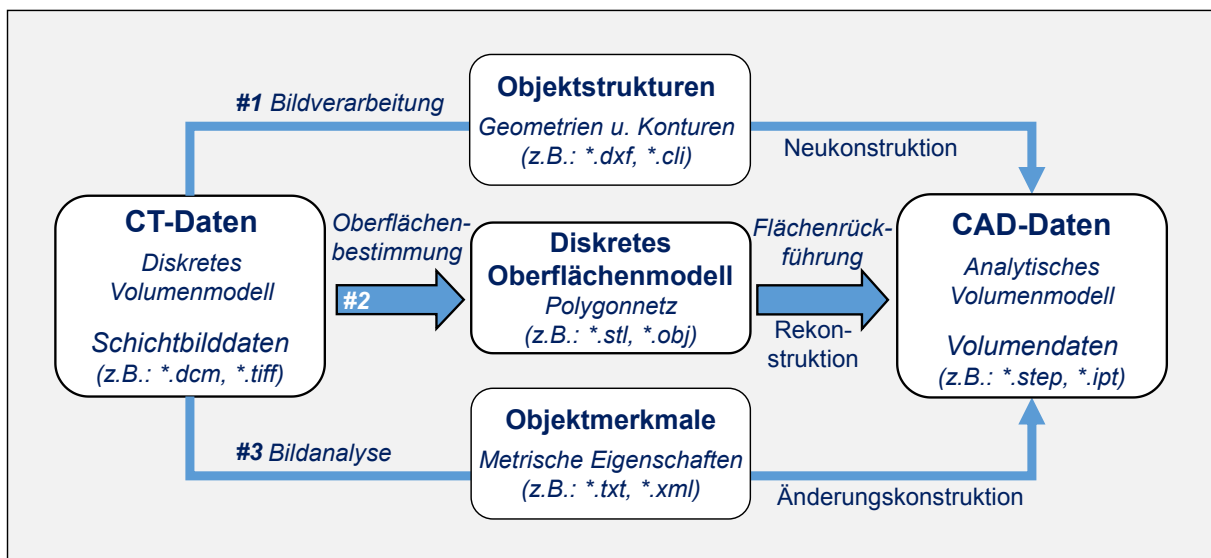


Abbildung 2-8: Prozessketten zur Darstellung der Repräsentationsformen und Datenformate

Die Übertragung abgeleiteter Repräsentationsformen erfolgt grundlegend in unterschiedlichen Datenformaten.

Hierbei wird allgemein zwischen neutralen, proprietären und industriestandardisierten Formaten unterschieden. Neutrale Datenformate definieren eine anerkannte, verifizierte und unabhängig genormte Daten- und Modellbeschreibung, die eine einheitliche Übertragung zwischen unterschiedlichen Herstellern und Anwendern ermöglichen (z.B. DICOM⁹, STEP⁹) [35, 51]. Proprietäre oder auch native Datenformate sind in der Regel herstellerspezifisch und in ihrer Formatierung an individuelle Produkte des Herstellers gebunden (z.B. IPT¹⁰, PRT¹¹). Industriestandardisierte Formate werden allein durch herstellerunabhängige Standards definiert. Obwohl sie als industrielle Formate ohne feste Norm nicht an Notationen gebunden sind, werden sie heutzutage in zahlreichen Anwendungen genutzt (z.B. STL, OBJ¹²).

In Einzelfällen können auch primär proprietäre Datenformate durch allgemeine Verbreitung ihrer Merkmale sekundär zum Industriestandard (z.B. DXF) oder zum internationalen Standard (z.B. JT¹³) werden [14, 52].

⁹ STEP: STANDARD FOR THE EXCHANGE OF PRODUCT MODEL DATA [51]

¹⁰ IPT: proprietäres Dateiformat für AUTODESK[®] INVENTOR[®]-Dateien

¹¹ PRT: proprietäres Dateiformat für ein CREO[®] PARAMETRIC Einzelteil

¹² OBJ ist ein offenes Dateiformat für diskrete dreidimensionale Formen.

¹³ JT: JUPITER TESSELLATION

2.1.5 Segmentierungsverfahren

Um aus Bild- und Volumendaten Objektstrukturen und dreidimensionale Modelle extrahieren zu können, gibt es verschiedene Verfahren, die der Begriff Segmentierung zusammenfasst [32]. Dabei erfolgt die Extraktion lokaler Objekteigenschaften entsprechend einem Homogenitätskriterium durch die Zusammenfassung der Pixel oder Voxel [32]. Bei diesem Prozess wird unterschieden, welcher Bildpunkt zu einem Objekt gehört und welcher nicht [53]. Durch die Zuordnung einzelner Pixel zu Segmenten kann ein Bild in verschiedene Regionen eingeteilt werden [54]. Zu ihrer Beurteilung werden die Veränderungen eines Bildpunktes nachfolgend über seine Grauwertbereiche und Gradienten untersucht. Um daraus Grenzflächen oder definierte Objekte ableiten zu können, müssen die entsprechenden Übergänge bestimmt werden. Dies sind bei erfassten Objekten die Grenzflächen unterschiedlicher Dichtebereiche. Für ihre Bestimmung existieren vier verschiedene Verfahren, die nachfolgend vorgestellt werden [53].

Pixelbasierte Segmentierung

Bei einer pixelbasierten Segmentierung entstehen für einzelne Bildpunkte unter Anwendung globaler Merkmale separate und eindeutige Zuordnungen [30]. Dabei handelt es sich um Grauwerte, die als Schwelle zur Binarisierung¹⁴ (Schwellwerte) genutzt werden [30]. Diese Schwellwerte können beispielsweise über eine Histogramm-Analyse (Abschnitt 2.1.6) bestimmt werden.

Die schwellwertbasierte Oberflächenbestimmung zählt zu den in der Praxis am häufigsten angewandten Segmentierungsverfahren (Problemstellung 1.2) [30]. Als pixelbasiertes Verfahren erfolgt die Oberflächenbestimmung durch Analyse stetiger Grauwertintensitäten [18]. Dabei wird über einen globalen Schwellwert, jedem Pixel oder Voxel eine entsprechende Kategorie (z.B. Objekt oder Luft) zugeordnet [30, 53]. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist ein vernetztes Polygonmodell (Diskretes Oberflächenmodell), das aus einer zusammengesetzten diskreten Oberfläche besteht (Abbildung 2-9). Beispiele für pixelbasierte Segmentierungsverfahren sind der MARCHING TETRAEDER, der DIVIDING CUBES oder der MARCHING CUBES ALGORITHMUS [30, 55].

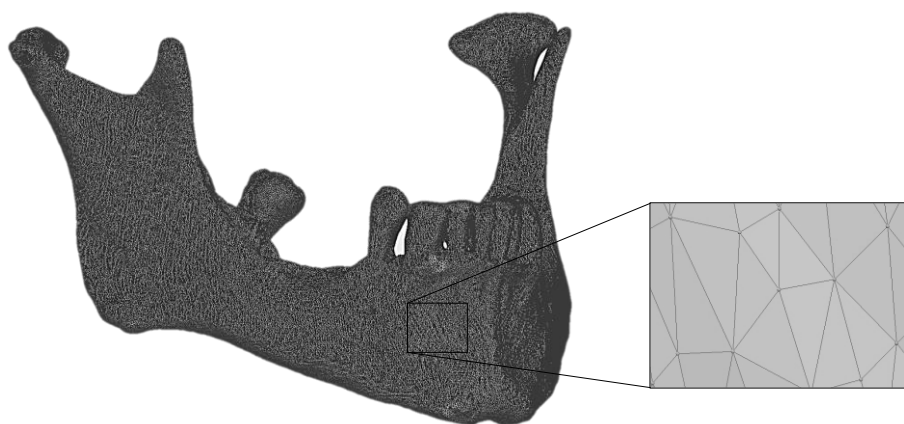


Abbildung 2-9: Vernetztes Polygonmodell eines Unterkieferknochens mit Detaillierung der Struktur

¹⁴ Umwandlung eines Grauwertbildes in ein Binärbild, das heißt jeder Pixel wird einem von zwei Segmenten (Objekt oder Luft) zugeordnet.

Kantenbasierte Segmentierung

Bei kantenbasierten Verfahren werden definierte Nachbarschaftsbeziehungen der Pixel genutzt, um unter Einbeziehung von lokalen Merkmalen über deren Zuordnung zu entscheiden. Nach JÄHNE ist eine Kante dabei mathematisch durch die Position des Maximalwertes der ersten Ableitung oder durch einen Nulldurchgang der zweiten Ableitung charakterisiert. Dadurch ist die gefundene Grenzposition lediglich von Gradienten und nicht vom eigentlichen Grauwert abhängig. Für eine eindeutige Zuordnung des Pixels zu seiner assoziierten Region ist es nicht ausreichend, allein die Grenzposition zu identifizieren. Entscheidend ist vielmehr der Gradientenverlauf, der in einen Zusammenhang zur Kantenform gebracht werden muss. Dies geschieht über sogenannte Konturverfolgungsverfahren. Dabei folgt die Konturierung objektzentriert dem Maximum des Gradienten bis zum Erreichen des ursprünglichen Ausgangspunktes. [30, 53]

Kantenbasierte Verfahren sind industriell etabliert und werden häufig zur Detektion unterschiedlicher geometrischer und beliebiger Objektstrukturen verwendet (Abbildung 2-8, #1). Bewährte Vertreter sind der CANNY, der SOBEL- oder der KIRSCH-Operator [56].

Regionenbasierte Segmentierung

Bei regionenbasierten Segmentierungsverfahren werden zusammenhängende Bereiche in einem Gebiet direkt detektiert [30]. Im Gegensatz zu den bisher erwähnten kanten- oder pixelbasierten Verfahren werden sie nicht über Kanten und Einzelpunkte definiert [30]. Die Pixel werden aufgrund ihres Grauwertes untersucht und so den entsprechenden Objekten zugeordnet [53]. Dabei spielen neben den für die Segmentierung maßgeblichen Regionen sogenannte Startwerte eine wichtige Rolle.

Abbildung 2-10 zeigt das Prinzip des REGION GROWING [57]. Initial wird ein spezieller Startpixel definiert, das als sogenannter Saatpunkt die Region systematisch und kontinuierlich vergrößert [30]. Im dargestellten Beispiel erfolgt dies unter graphischer Einbeziehung der vier unmittelbar benachbarten Bildpixel. Alle Bildpunkte erfüllen das Homogenitätskriterium [32]. Die bildtechnische Herausforderung besteht lediglich in der Festlegung geeigneter Startpixel [30]. Die dimensionale Erweiterung eines definierten Areals zu einem Volumen kann über die Betrachtung der räumlichen Nachbarschaften erreicht werden.

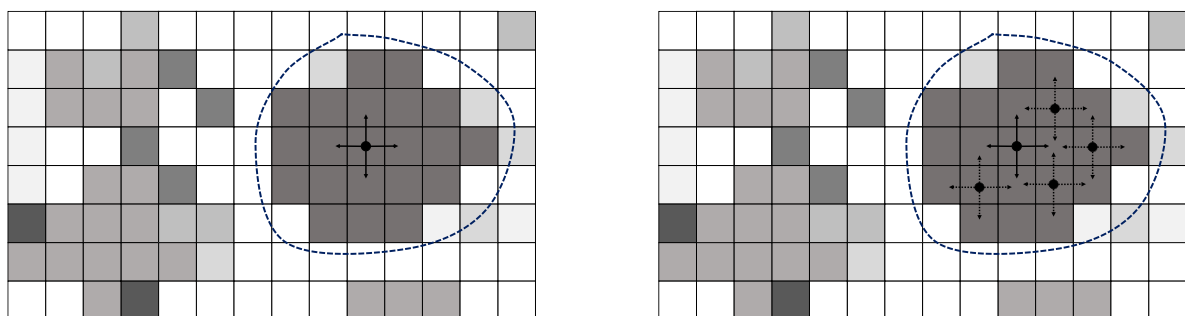


Abbildung 2-10: Prinzip einer regionenbasierten Segmentierung - Eingrenzen einer fiktiven Region und Setzen eines Saatpunktes (links), Pixel mit den gleichen Eigenschaften einer Region werden gesucht (rechts) (Nach [57])

Modellbasierte Segmentierung

Alle drei genannten Verfahren nutzen somit lokale Informationen [53]. „Wenn jedoch die geometrische Form eines Objektes bekannt ist“, bieten sich nach JÄHNE modellbasierte Verfahren an [53]. Sie werden verwendet, um in Bilddateien bekannte Geometrien und Konturen zielgerichtet und schnell zu finden, selbst wenn diese fehlerhaft, unkenntlich und unvollständig sind. Um zur Lokalisierung von Bildinformationen geeignete Modelle nutzen zu können, sind gegebene Formen eines gesuchten Objektes von Vorteil [30]. Hierfür existieren bereits verschiedenen technische Umsetzungen. Industriell etablierte Beispiele sind die Erstellung repräsentativer Trainingsdaten auf Basis bekannter geometrischer Strukturen (z.B. HOUGH¹⁵) sowie potenziell parametrische Daten (z.B. ACTIVE CONTOURS¹⁶).

Die Segmentierung ist der erste Schritt der Bilddateninterpretation [32]. Zur Überführung inhomogener Pixelmengen in definierte Objekte wie Geometrien und Konturen ist in der Regel ein mehrstufiger Prozess notwendig [32]. Hierbei sind weitere sequenzielle Schritte erforderlich, wie etwa eine spezifische Merkmalerkennung und Merkmalsklassifikation. Sie überführen die vorläufig generierte Struktur in eine geometrisch diskrete oder eine analytische und damit endgültige Form. Die meisten Segmentierungsverfahren haben sich aus dem zweidimensionalen entwickelt und können auch auf den dreidimensionalen Bereich adaptiert werden. [53, 56, 60]

Als Objektstrukturen werden in dieser Arbeit die Ergebnisse jeweiliger Segmentierungsverfahren verstanden. Sie können in Abhängigkeit von zusätzlich angewandten Methoden unterschiedliche Repräsentationsformen abbilden. Stellvertretend für die vorliegende Problem- und Zielstellung werden analytische Geometrieformen und diskrete Konturen adressiert. Diskrete Oberflächenmodelle sind ebenfalls das Ergebnis eines Segmentierungsschrittes. Diese werden jedoch als separate Repräsentationsform betrachtet, weil sie den methodisch etablierten Prozess verdeutlichen (Abschnitt 1.2).

2.1.6 Bestimmung charakteristischer Objektmerkmale

Computertomographische Daten werden als Bilddaten gespeichert. Somit sind neben Methoden der Bildverarbeitung auch sämtliche Techniken der Bildanalyse anwendbar, um nach HANDELS „Merkmale zur quantitativen Beschreibung von Bildobjekten zu ermitteln“ [32]. Diese Verfahren ermöglichen es, zusammengehörige Objektinformationen numerisch zu ermitteln. Daraus ergibt sich eine Beschreibungsform, die keine Modellform definiert, sondern charakteristische *Objekteigenschaften* repräsentiert [32].

Objektmerkmale charakterisieren folglich immanente Eigenschaften der erfassten Objekte, die aus den CT-Daten über verschiedene Verfahren ermittelt werden können. Die entsprechende Objektbeschreibung beziehungsweise deren Konstellation kann anhand zahlreicher Parameter und Formen erfolgen.

¹⁵ HOUGH-Transformation: Verfahren zur Detektion von Geraden und Kreisen in Binärbildern [58].

¹⁶ ACTIVE CONTOURS: Verfahren zur Anpassung von initialen, parametrischen Kurven an Konturen im Originaldatensatz mittels Energieminimierung [30, 59].

Die wesentlichsten zwei- und dreidimensional genutzten Verfahren zur Bestimmung von Objektmerkmalen werden nachfolgend vorgestellt [32, 56].

Messfunktionen

Nach HANDELS können durch die Verfahren der elementaren Bildanalyse interaktiv einfache Maße und Maßbezüge direkt aus den Schichtbildern generiert werden [32]. Dies erfolgt durch Messfunktionen, welche gegenwärtig in nahezu allen Bildbearbeitungsprogrammen (z.B. IMAGEJ) angewandt werden [61]. Die in der Bildanalyse wichtigsten, zwei- oder dreidimensional genutzten Messfunktionen sind:

- Längen- und Abstandsmessung
- Winkelmessung
- Flächen- und Volumenbestimmung
- Umfangsmessung

Abbildung 2-11 verdeutlicht dies an einem technischen Beispiel.

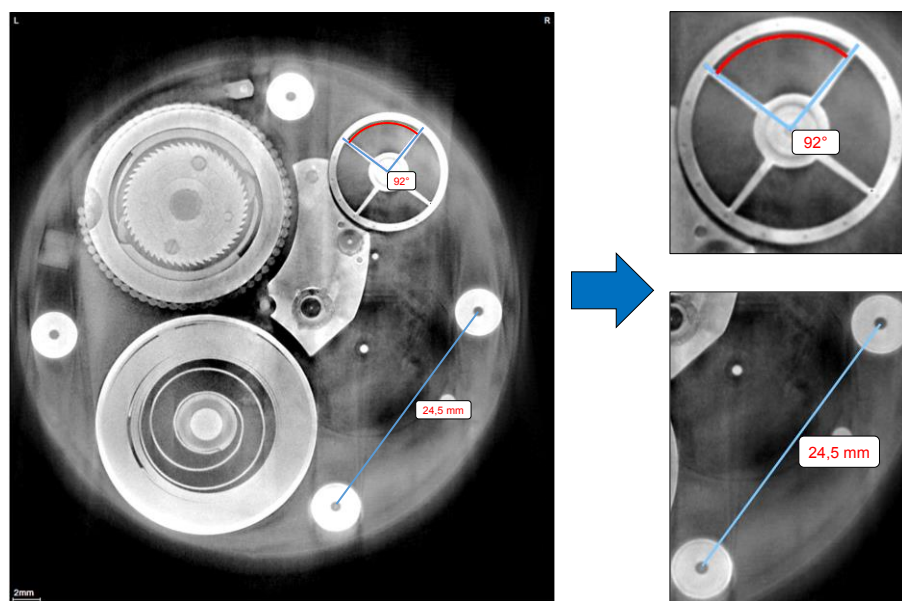


Abbildung 2-11: Computertomogramm einer Taschenuhr (links) - Messen eines Winkels (rechts oben) und eines Abstandes (rechts unten)

Zur erfolgreichen Anwendung der Verfahren ist eine eindeutige Skalierung notwendig. Dafür sind neben der exakten Position auch die in den Metadaten enthaltenen bildbasierten Merkmale, wie die Anzahl der Voxel eines Schichtbildes, deren Dimensionen und die Grauwerttiefe notwendig.

Region of Interest

Gezielt ausgewählte Regionen der Schichtbilder können mit speziellen Analysefunktionen separiert werden. Dies kann optional durch geometrische Eingrenzungen wie etwa durch Rechtecke oder Kreise, aber auch durch beliebig und individuell geformte Polygonzüge erfolgen.

Aus einer Region of Interest (ROI) können so Objektinformationen zwei- und dreidimensional abgeleitet werden. Dies ermöglicht es, neben der Extraktion allgemein geometrischer Angaben (z.B. Durchmesser, Länge) auch Aussagen zur erweiterten Bildanalyse wie beispielsweise die Bestimmung von Objektschwerpunkten oder spezifischen Materialdichten abzuleiten. Zudem können durch ROI auch bildbasierte Eigenschaften wie etwa der mittlere Grauwert oder die Grauwertvarianz bestimmt werden [32]. Abbildung 2-12 zeigt eine zweidimensionale ROI durch eine Kreisstruktur in einem medizinischen Computertomogramm.

Bounding Box

Die Bounding Box (BB) als morphologisches Bildanalyseverfahren erschließt in der Regel die Bildgrenzen (Bildstapelkoordinatensystem K_B , Abbildung 2-2) der untersuchten Sequenz und somit das gesamte Aufnahmevolumen (Abbildung 2-12) [60]. Dabei können auf die jeweilige Fragestellung speziell abgestimmte optische Achsen, die sogenannten kartesischen Bildachsen, durch Annäherung an die Objektkontur weitere Informationen extrahieren. Hierzu gehören beispielsweise das Seiten-zu-Längen-Verhältnis und der Füllungsgrad, der das Verhältnis der Objektfläche zur Fläche der Bounding Box oder analog dazu das Verhältnis der entsprechenden Volumina beschreibt [32].

Darüber hinaus reduzieren die Bounding Box und die Region of Interest den Speicherbedarf der untersuchten Bildsequenz und ermöglichen eine schnelle und ökonomische Datenverarbeitung [32].

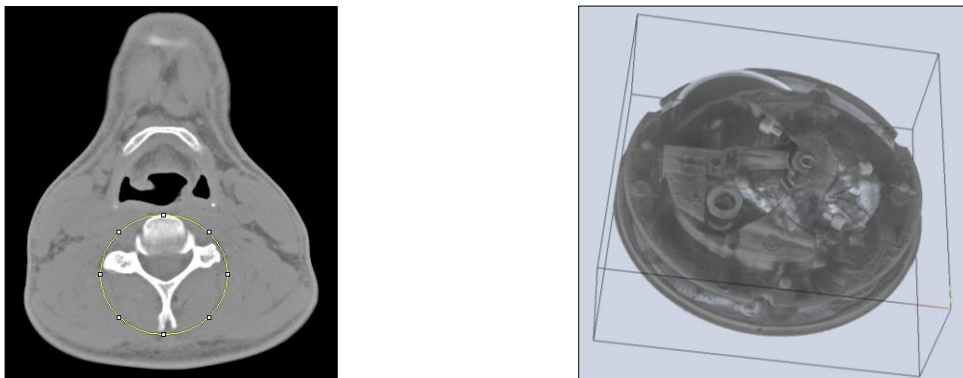


Abbildung 2-12: Schichtbild eines Schädels mit kreisförmiger Region of Interest (links), Bounding Box der Schichtbildsequenz eines Taschenuhrwerkes (rechts)

Landmarken

Das Bestimmen charakteristischer Objektmerkmale in computertomographischen Daten kann auch über eine Referenzierung ausgewählter Punkte, sogenannter Landmarken erfolgen. „Diese kennzeichnen markante Stellen und werden entweder interaktiv durch den Benutzer selektiert oder aufgrund besonderer geometrischer Eigenschaften algorithmisch bestimmt“ [32]. Landmarken können für unterschiedliche Anwendungen genutzt werden. In der Medizin dienen sie vorrangig bei der diagnostischen Unterstützung oder zur operativen Planung und Navigation [32]. Ebenso werden sie sowohl im medizinischen wie auch im technischen Umfeld

für die Registrierung unterschiedlicher Datensätze zum Vergleich verschiedener Objektzustände verwendet [62].

Histogramm-Analyse

In Histogrammen wird die Verteilung und die Häufigkeit auftretender Grauwerte dargestellt [53]. Bei entsprechend gutem Bildkontrast und sehr hoher Auflösung können typischerweise zwei Extreme der Häufigkeitsverteilung auftreten. Eines für das Objekt und eines für den Hintergrund (Abbildung 2-2). Die Extreme sind durch die Amplituden des Kurvenverlaufes gekennzeichnet. Bei Objekten, die aus unterschiedlichen Dichtebereichen bestehen, können in Abhängigkeit von der Anzahl der Grauwerte auch mehrere Extremwertbereiche und somit mehrere Amplituden existieren. Ausreichend hohe Dichtegradienten sind dabei eine methodisch notwendige Bedingung. [55, 63]

Abbildung 2-13 zeigt das Histogramm eines industriellen CT-Datensatzes mit einem exemplarischen Schichtbildauszug einzelner Merkmale. Dabei verdeutlicht die eingefügte rote Vertikale den empfohlenen Schwellwert zur Bestimmung der Bauteiloberfläche.

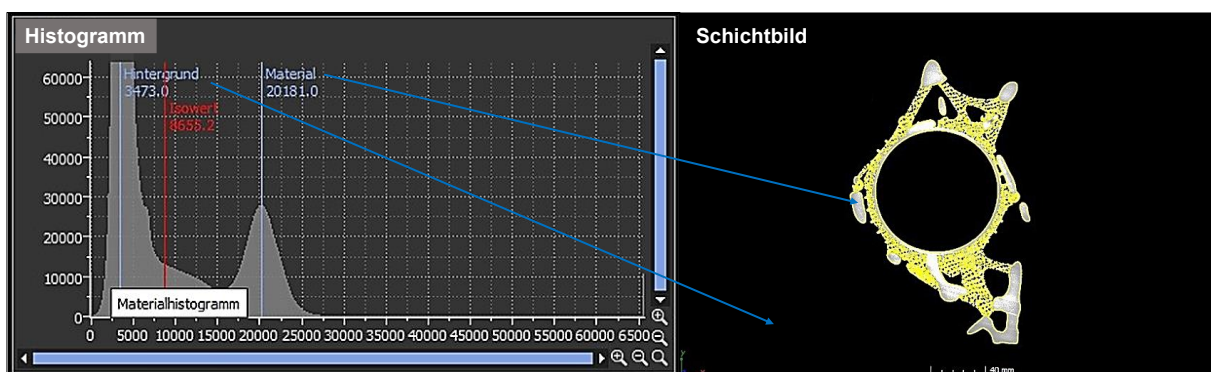


Abbildung 2-13: Histogramm-Analyse eines Radträgers mit Auszug einer Schichtbildsequenz aus dem Voxelvolumen, Aufnahme mit VOLUME GRAPHICS MAX 3.3.2 [64]

Eine Zusammenfassung von Objektmerkmalen, die aus den vorgestellten Verfahren extrahiert werden können zeigt Tabelle 2-2.

Tabelle 2-2: Verfahren der Bildanalyse und zugehörige Ergebnisse

Bildanalyseverfahren	Ergebnisse der Bildanalyse
<ul style="list-style-type: none"> Region of Interest (2D, 3D) + verfügbare Messwerkzeuge + Position + Bildbasierte Metadaten 	<ul style="list-style-type: none"> Länge / Abstand Radius / Durchmesser / Umfang Winkel Fläche / Volumen
<ul style="list-style-type: none"> Bounding Box 	<ul style="list-style-type: none"> Seiten-zu-Längen-Verhältnis Füllungsgrad
<ul style="list-style-type: none"> Landmarken 	<ul style="list-style-type: none"> Punkte markanter Objektbereiche
<ul style="list-style-type: none"> Histogramm 	<ul style="list-style-type: none"> Grauwertverteilung / Dichtebereiche

2.2 Methoden und Werkzeuge der Konstruktion

2.2.1 Übersicht

Nach PAHL / BEITZ werden zur Modellierung mechanischer Produkte vor allem 3D-CAD-Systeme eingesetzt [26]. Sie beschreiben nach STELZER / STEGER die geometrische Gestalt und Struktur technischer Produkte [65]. Mit ihnen ist es somit möglich, Geometriemodelle (Volumenmodelle) zu modellieren, die als Ausgangsbasis für Prozesse der virtuellen Produktentwicklung dienen [66]. Als Modellierung wird dabei der konstruktive Prozess verstanden, indem alle relevanten geometrischen Eigenschaften und Gestaltungselemente sowie deren Bezüge definiert und in Form von dreidimensionalen Geometriemodellen rechnergestützt abgebildet werden [14, 66].

CAD-Systeme können nach ihrem Einsatzgebiet, ihrer Funktion oder nach der Art ihrer Eingangsdaten klassifiziert werden [18]. Dabei sind bevorzugte technische Anwendungen der Maschinen- und Anlagenbau, der Werkzeug- und Formenbau sowie das Produktdesign. Funktionell werden damit sowohl Flächen- oder Volumenkonstruktionen als auch Simulationsprozesse realisiert. Als Grundlage zur Modellierung werden diskrete und analytische Modelldaten unterschieden.

Analytische Modelldaten bestehen nach VAJNA ET AL. aus topologisch geschlossenen Oberflächenverbänden [14]. Diese werden über geometrische Grundformen wie Primitive¹⁷ und Freiformflächen¹⁸ erstellt [62]. Bei der CAD-Modellierung entstehen Geometriemodelle, die analytisch eine vollständige dreidimensionale Objektbeschreibung ermöglichen. Neben der äußeren Gestalt und dem Volumen können das verwendete Material des Objektes sowie weitere physikalische Parameter erfasst werden. Volumen und Material werden dabei homogen über den gesamten Modellquerschnitt verteilt. Ihre physikalischen Eigenschaften können sowohl punkt-, linien- als auch netzförmig determiniert sein und entsprechend graphisch dargestellt werden [66].

In dieser Arbeit wird bei Analytischen Geometrieformen zwischen Grundgeometrien und Freiformgeometrien unterschieden. Dabei können einzelne ebene oder räumliche Geometrielemente vorkommen. Konsekutiv sind vollständige Einzelteile, die jeweils aus Primitiven zusammengesetzt sind ebenso möglich. Freiformgeometrien beschreiben partielle oder vollständige Objekte und damit Freiformkurven oder Freiformflächen.

Diskrete Modelldaten definieren Objekte auf Basis ihrer topologischen Zusammenhänge [62]. Diese Formgebung erfolgt entweder über eine Ansammlung von Punkten (Punktwolke) oder über ein diskretes Oberflächenmodell (Polygonmodell). Durch die Position einzelner Punkte im kartesischen Koordinatensystem können Punktwolken charakterisiert werden, die in ihrer Gesamtheit ein dreidimensionales Objekt repräsentieren. Hingegen kennzeichnet das

¹⁷ Primitive sind analytische Geometrien auf Basis von Punkten und Linien, aus denen ebene Geometrieformen wie etwa Dreiecke, Vierecke, Kreise und räumliche Geometriefiguren wie Quader, Kugel, Kegel, Zylinder oder Pyramiden gebildet werden können [67].

¹⁸ Freiformflächen werden über beliebig gekrümmte Formen definiert [62].

Diskrete Oberflächenmodell ein tesseliertes¹⁹ Netzmodell, welches aus zusammengesetzten Flächen besteht. Jede Fläche wird über ihre lokale Position und Orientierung im kartesischen Raum definiert. Die dadurch abgebildeten Objekte verfügen somit über eine räumliche Anordnung, die analytisch nicht weiter spezifiziert werden kann.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden neben diskreten Oberflächenmodellen auch nach Diskreten Konturen unterschieden. Diese definieren eine festgelegte Menge an Punkten, die geometrischen Grundformen entsprechen oder einen freien Konturverlauf an einem Objekt widerspiegeln aber mathematisch zusammenhängend nicht definiert werden können.

Die Grundlage dieser Arbeit bilden computertomographische Daten. Deren assoziierte Objekteigenschaften können dementsprechend über folgende Repräsentationsformen abgebildet werden (Abschnitt 2.1.4):

- Diskrete Oberflächenmodelle
- Objektstrukturen als Analytische Geometrieformen und Diskrete Konturen
- Objektmerkmale, numerisch (z.B. Maß) oder referenzierend (z.B. Landmarken)
- CT-Daten als Schichtbildsequenz

Dabei werden neben den abgeleiteten Repräsentationsformen auch die Rohdaten der Schichtbilder und somit die originäre Schichtbildsequenz erfasst. In ihnen sind grundsätzlich noch alle primären computertomographischen Informationen enthalten. Abbildung 2-14 zeigt verschiedene Wege der Nutzung dieser Repräsentationsformen in CAD-Systemen.

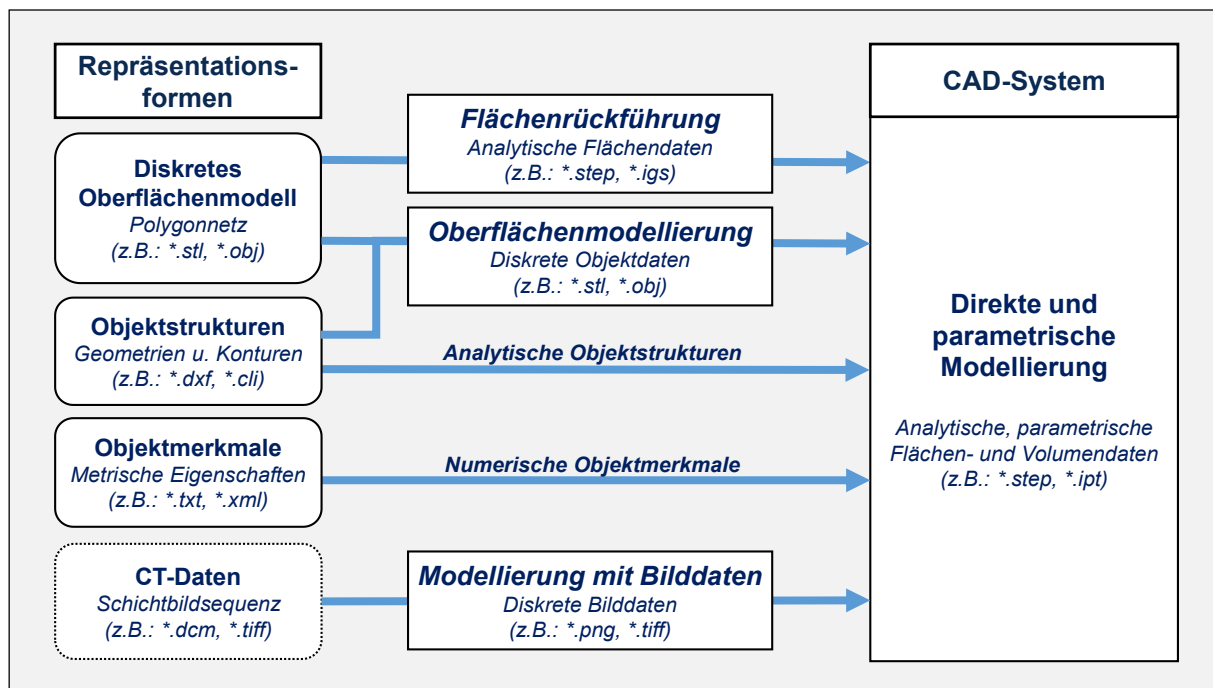


Abbildung 2-14: Modellierungsvarianten computertomographischer Repräsentationsformen in CAD-Systemen

¹⁹ Tessellieren ist das Verbinden von 3D-Punkten einer Punktwolke zu einem Polygonnetz oder auch Polygonmodell. Die gegenwärtig etablierteste topologische Form von Polygonmodellen sind Dreiecksnetze. [20]

Einerseits können Polygonmodelle oder diskrete Konturen über eine Oberflächenmodellierung verarbeitet werden. Andererseits wird für eine analytische Rekonstruktion diskreter Oberflächenmodelle eine Flächenrückführung angewendet. Liegen dagegen bereits einzelne analytische Geometrien oder Objektmerkmale vor, können sie als Eingangsdaten für eine direkte oder parametrische Modellierung dienen. Obwohl die Nutzung computertomographischer Daten in CAD-Systemen funktionell und damit methodisch begrenzt ist, können jedoch Bilder und graphische Darstellungen verarbeitet werden. Diese sind als Rastergrafik durch Pixel mit verschiedenen Farbwerten visualisiert. [24, 68, 69]

2.2.2 Modellierung auf Basis diskreter Oberflächen

Aktuelle CAD-Systeme können grundlegend verschiedene Formen diskreter Modelldaten visualisieren. Allerdings wird Ihre Nutzbarkeit durch die begrenzte Anzahl bearbeitungsfähiger Elemente limitiert. [24, 68, 69]

Liegen die Daten als eine räumliche Verteilung an Punkten vor, ermöglichen CAD-Systeme die Überführung dieser Punktwolken in zusammenhängende Flächen. Hieraus werden Volumenmodelle erstellt. Im Gegensatz dazu werden diskrete Oberflächenmodelle als reine Flächenmodelle interpretiert. Im Transformationsprozess entspricht dabei jede Dreiecksfacette einer Einzelfläche, die nachfolgend ebenfalls in ein Volumenmodell überführt werden kann.

Der Funktionsumfang zur Bearbeitung diskreter Oberflächenmodelle ist in aktuellen CAD-Systemen begrenzt möglich [24, 68, 69]. Sie verfügen über einzelne Funktionen zur Netzbearbeitung und Homogenisierung. Diese werden benötigt, um später eine Modellaufbereitung durchzuführen. Dabei wird der interessierende Bereich vom übrigen Modell separiert und graphisch aufbereitet (Abbildung 1-2). Dies bildet zudem auch den Ausgangszustand der Flächenrückführung, welche in Abschnitt 2.2.3 näher betrachtet wird. Zur unmittelbaren Modellierung müssen die Polygonflächen zunächst in eine analytische Form überführt werden. Das erfolgt über die Erstellung von Konstruktionsreferenzen aus den diskreten Modellformen. Abbildung 2-15 zeigt den prinzipiellen Ablauf am Beispiel eines Formteils.

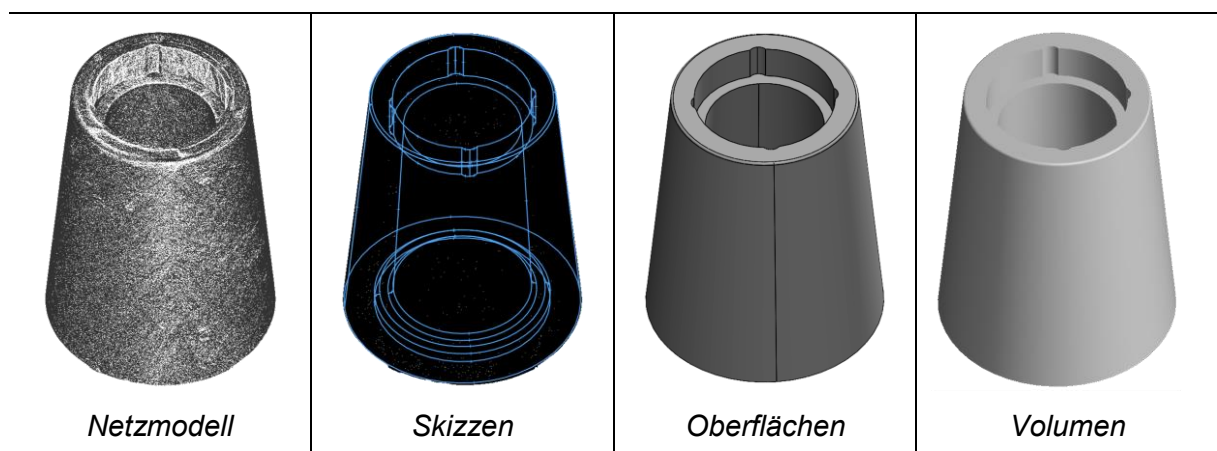


Abbildung 2-15: Erstellung eines analytischen Volumenmodells aus einem Polygonmodell (Nach [70])

Das importierte Netzmodell wird zuerst in eine definierte Ansichtsposition gebracht. Mit festgelegten Kurvenfunktionen werden einzelne Skizzen erstellt und sequenziell zu Oberflächen

zusammengefügt. Entsprechende Schnitt- und Begrenzungskurven überführen die einzelnen Oberflächen abschließend in ein analytisches Volumenmodell. Einige CAD-Systeme verfügen über Funktionen, welche diesen Prozess unterstützen und einzelne Schritte automatisieren (z.B. SCANTO3D in SOLIDWORKS®) [71]. Zudem existieren Plugin-Lösungen von Anbietern kommerzieller Scan- und Netzdatensoftware, die in gängige CAD-Systeme integriert werden können (z.B. GEOMAGIC® DESIGN™ X) [72].

2.2.3 Flächenrückführung

Um Modelldaten mit Werkzeugen der Produktentwicklung zu erstellen und zu bearbeiten, ist eine Überführung diskreter Oberflächendaten in das analytische Modell erforderlich [73]. Dies erfolgt durch eine Flächenrückführung. Dabei wird in Abhängigkeit von der Komplexität der digitalen Objekte zwischen folgenden Rückführungsmethoden unterschieden [20, 62, 73]:

- Parametrische Flächenrückführung mit Regelgeometrie
- Kurven- oder freiformflächenbasierte Rückführung
- Nichtparametrische Flächenrückführung

Ausgangspunkt der Flächenrückführung sind immer die bei der Segmentierung erstellten diskreten Modelldaten. Zuerst werden die Polygonflächen durch sogenannte Berandungskurven in unterschiedliche Areale aufgeteilt (Abbildung 2-16). Diese Einteilung geschieht vor allem nach der Funktion und der geometrischen Objektoberfläche. Durch individuell angepasste Flächenstücke, sogenannten Patches erfolgt danach die Definition einer mathematisch beschriebenen Fläche, wie z.B. BÉZIER, HERMITE oder B-SPLINES [20, 73]. Die heute häufigsten medizinisch-technischen Anwendungen der Flächenrückführung sind die NURBS²⁰-Flächen, eine Verallgemeinerung der B-SPLINES [50]. Damit können sowohl geometrische Grundformen als auch Freiformflächen abgebildet werden [20]. Die Summe der einzelnen Patches ergibt schließlich die stetige Flächeninformation [20]. Da dieser Prozess über eine Approximation an die Ausgangsfläche erfolgt, liegen nicht alle diskreten Modellpunkte in der rückgeführten Fläche, was zu Ungenauigkeiten in der Rekonstruktion führen kann [18]. Im Ergebnis entsteht ein analytisches Flächenmodell, das in einem neutralen Datenformat wie IGES²¹ oder STEP gespeichert werden kann [20, 51, 74].

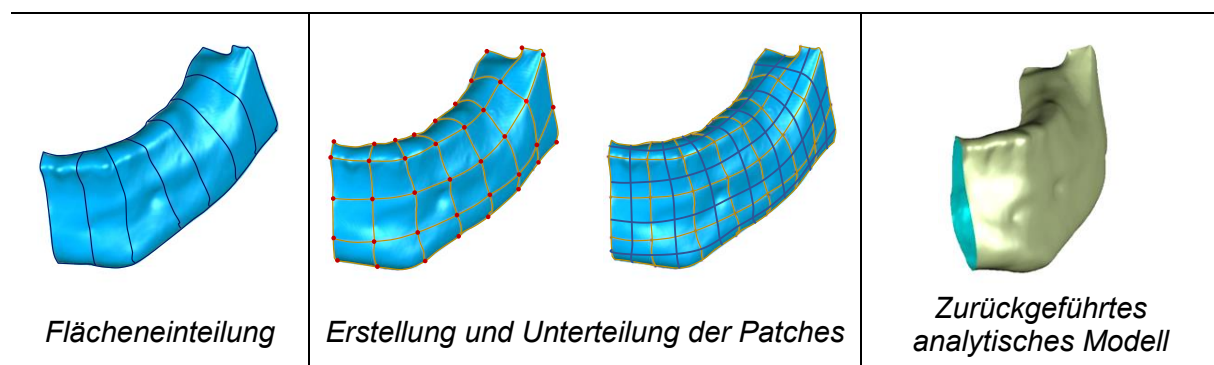


Abbildung 2-16: Phasen der Flächenrückführung am Beispiel eines Unterkieferknochenmodells [18]

²⁰ NURBS: NON-UNIFORM RATIONAL B-SPLINE

²¹ IGES: INITIAL GRAPHICS EXCHANGE SPECIFICATION

In ausgewählten CAD-Systemen können zusätzliche Anwendungen (z.B. MESH ENABLER im AUTODESK® INVENTOR® 2020) integriert werden, die eine automatische oder teilautomatische Erstellung eines analytischen Volumenmodells aus einem Netzmodell realisieren [75]. Dabei gibt es im Vergleich zu bereits etablierten Systemen weniger Einstellungsoptionen zur Steuerung der Ergebnisqualität. Zudem ist trotz einer insgesamt hohen Bearbeitungsdauer die erreichbare Modellqualität des so erstellten analytischen Volumenmodells deutlich geringer.

2.2.4 Direkte und parametrische Modellierung

Um ein analytisches Volumenmodell zu erstellen, werden parametrisch definierte Einzelteile modelliert und nachfolgend entsprechende Baugruppen generiert. In CAD-Systemen ist zur Einzelteilmodellierung, das heißt zur Bildung einer analytischen Modellform, grundsätzlich folgende systematische Vorgehensweise notwendig, wobei einzelne Schritte auch optional verwendet werden können [65, 76–79]:

a) Erstellen einer Skizzengeometrie

- Fertigung einer Geometrie über Skizzierfunktionen²² mit Primitiven oder Freiformkurven auf einer Basisreferenz (z.B. kartesische Koordinatenebene)
- Parametrisieren²³ der Geometrie durch Festlegen von Maßbezügen und Referenzen
- Erzeugung von Abhängigkeiten²⁴ (z.B. parallel, coaxial) zwischen den einzelnen Geometrie-Elementen [14]

b) Modellierung des Volumenkörpers

- Erzeugen einer 3D-Geometrie durch Austragen (z.B. Extrusion, Rotation) der Skizze
- Erstellen weiterer geometrischer Formelemente durch Spiegelung und Mustererstellung mit Definition von Konstruktionsreferenzen
- Integrierung von Feature²⁵-Elementen wie Bohrungen, Fasen und Gewinde

Als Konstruktionsreferenzen werden Koordinatensysteme und einzelne geometrische Elemente (z.B. Skizzenpunkt, Rotationsachse, Referenzebene) genutzt, die zur Orientierung und Unterstützung bei der Modellierung dienen. Diese Referenzen können über Skizzierfunktionen erstellt werden oder auch von anderen, bereits vorhandenen CAD-Modellen abgeleitet sein. [14]

Darüber hinaus kann das Modell noch über verschiedene Eigenschaften wie etwa Materialkennzeichnungen oder Texturen erweitert werden.

²² Skizzierfunktionen sind Elemente zur Erstellung geometrischer Grundformen. Typische Vertreter sind Punkte, Linien, variable Kreisformen und Splinekurven.

²³ Parametrisieren ist das Steuern der Geometrie von CAD-Modellen durch Bilden von Zusammenhängen zwischen den Parametern, die diese Geometrie beschreiben.

²⁴ Abhängigkeiten steuern die Lage und Größe einzelner Skizzierelemente, so dass bei Veränderung einzelner geometrischer Eigenschaften, das Bauteil seine generell definierte Form beibehält [77]. In der Literatur wird häufig auch der Begriff *Beziehungen* dafür verwendet [14, 65].

²⁵ Features sind Informations- und Integrationsobjekte, die geometrische, technologische oder funktionale parametrische Eigenschaften beinhalten (z.B. Bohrungen - Art, Durchmesser, Länge) [14, 66].

Die Modellierung bildet das Kernelement bei der Erstellung des Volumenmodells. In unterschiedlichen proprietären CAD-Systemen sind so für bestimmte Modellieraufgaben verschiedene Strategien verfügbar. Je nach Bedarf können über spezielle Funktionsbausteine auch individuelle Schrittfolgen hinzugefügt oder entfernt werden. Vor Beginn einer Modellierung wird festgelegt, welche Funktionalitäten systemseitig verfügbar sind und welche Strategie die Eigenschaften des Modells am besten absichert [79]. Je nach Branche (z.B. Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau) und Aufgabenstellung (Neu-, Varianten- oder Änderungskonstruktion) wird grundlegend zwischen zwei Modellierstrategien unterschieden - der direkten und der parametrisch-assoziativen [73].

Beim direkten Modellieren werden nach VDI 2209 Modelle ohne die explizite Verwendung von Parametern und Referenzen zwischen den einzelnen Modellelementen erzeugt [66]. Signifikant für diese Art der Modellerzeugung sind die einfache und schnelle Erstellung und die flexible Anpassung durch direktes Ziehen, Kippen oder Schieben der Geometrien [25]. Das direkte Modellieren findet hauptsächlich Anwendung in der Entwurfsphase der Konstruktion. Hier werden erste Proportionen der später endgültig definierten Form festgelegt. Abbildung 2-17 zeigt das grundlegende Prinzip einer direkten Modellierung.

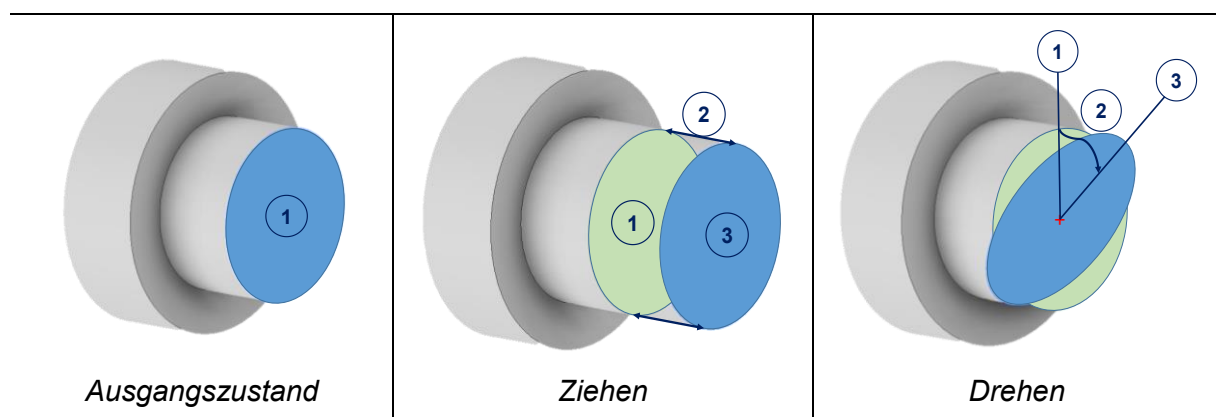


Abbildung 2-17: Prinzip der direkten Modellierung: 1. Markieren, 2. Ziehen oder Drehen, 3. Bestätigen und Beenden

Dagegen werden bei der parametrischen Modellierung die Modelle auf Grundlage numerischer Werte und parametrischer Elemente erstellt (Abbildung 2-18). Diese können Primitive, Features oder Abhängigkeiten sein. Durch die Änderung einzelner Eigenschaften eines Elementes wird konsekutiv das Modell selbst auf Konsistenz überprüft und nachfolgend an die geänderten Messgrößen angepasst [25]. Diese durchgehend dynamische Anpassung erfolgt parametrisch assoziativ, da sie Elemente in Form von Parametern, Referenzen oder geometrischen Zwangsbedingungen miteinander verbindet. Jeder dabei vollzogene Schritt wird in einer Konstruktionshistorie, dem sogenannten Modellbaum dargestellt. [65, 77, 79]

Das Ergebnis der direkten und parametrischen Modellierung ist ein parametrisches homogenes Volumenmodell, das analytisch beschrieben werden kann. Erfolgt die Speicherung in einem nativen Datenformat, verfügt das Objekt über die bereits genannte Konstruktionshistorie aus Features und Abhängigkeiten. Dies kann bei der Verwendung von Systemen des gleichen Herstellers und bei Änderungskonstruktionen von Vorteil sein.

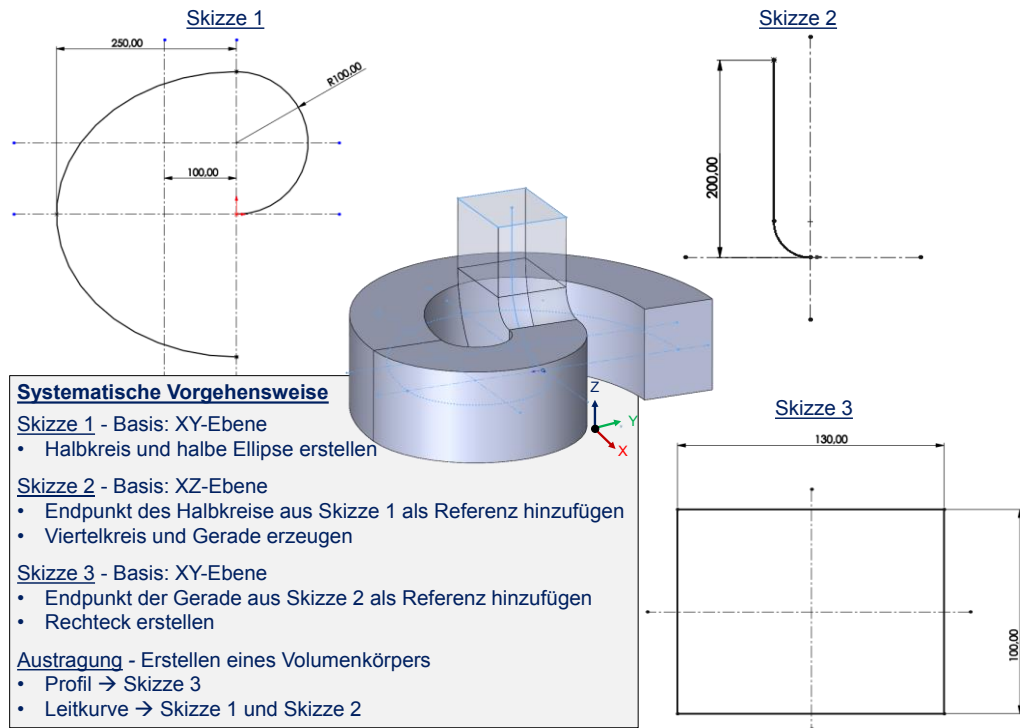


Abbildung 2-18: Systematische Vorgehensweise einer parametrischen Modellierung (Nach [79])

2.2.5 Modellierung mit Bilddaten

Eine weitere Möglichkeit zur Modellierung besteht darin, Bilddaten direkt in CAD-Systemen anzuwenden. Aktuell verfügbare Systeme sind in der Lage, klassische Bilddaten als Fotografien, Zeichnungen oder Skizzen zu visualisieren und damit zur Modellierung zu nutzen. Dabei beeinflussen einfache Werkzeuge der Bildbearbeitung wie Größe, Helligkeit, Kontrast die Qualität der Bilder. Allerdings ist es bisher nicht möglich, ganze volumenorientierte Schichtbildsequenzen in CAD-Systemen zu verwenden. [14, 24, 68, 69]

Um Objektinformationen in Bilddaten nutzen zu können, stehen die bekannten Messfunktionen aus dem Umfeld der Bildanalyse zur Verfügung. Darüber hinaus ist es möglich, Funktionen zur Skizzenerstellung anzuwenden, um daraus Geometrien und Objektkonturen nachzubilden. Voraussetzung hierfür sind die entsprechenden Maß- und Geometriebezüge. Außerdem verfügen einige Systeme über Werkzeuge aus dem Bereich der Bildverarbeitung. Mit ihnen ist es möglich, Objektkonturen zu erkennen und entsprechend in Geometrien zur Skizzenerstellung zu konvertieren [80]. Abbildung 2-19 zeigt diesen Prozess im CAD-System SOLIDWORKS®. Das bereits in Abschnitt 2.1.6 gezeigte Taschenuhrwerk ist in einer computertomographischen Schichtbildsequenz dargestellt. Dabei wird zunächst eine Bezugsebene gewählt, auf die das Skizzenbild referenziert wird. Sie ist als sogenannte Skizzierebene gleichzeitig die Grundlage der weiteren Bearbeitung. Anschließend wird die Region der Konturverfolgung durch entsprechende Selektionswerkzeuge (z.B. Freihand, Rechteck, Polygon), ähnlich einer ROI bei CT-Daten markiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 2-19 a eine Vorschau der detektierten Kontur. Verschiedene Editierungs- und Regulierungsinstrumente (z.B. Farbtoleranz, Erkennungstoleranz) können die Intensität der Objekterkennung anschließend nutzerdefiniert variieren.

Ein Resultat zeigt Abbildung 2-19 b. Dabei liegt die erfasste Kontur als Skizze auf dem importierten Schichtbild. Die Skizze besteht aus unterschiedlichen Skizzierelementen (z.B. Punkte, Spline, Linien), die vereinzelt miteinander verbunden sind. Um daraus eine kontinuierliche Skizzengeometrie zu erstellen, werden die einzelnen Elemente editiert und über Beziehungen zusammengefasst (Abbildung 2-19 c). Zusätzlich muss aus anderen Schichtbildern die Breite des Bauteils abgeleitet werden. Das Ergebnis dieses gesamten Prozesses ist ein homogenes, parametrisch-assoziatives Volumenmodell (Abbildung 2-19 d). Dieses kann sowohl in einem proprietären SOLIDWORKS®-Format, als auch in einem standardisierten neutralen Datenformat abgespeichert werden. Zur erfolgreichen Anwendung dieser Funktion sind entsprechend hohe Auflösung und Kontrast der Bilddaten erforderlich.

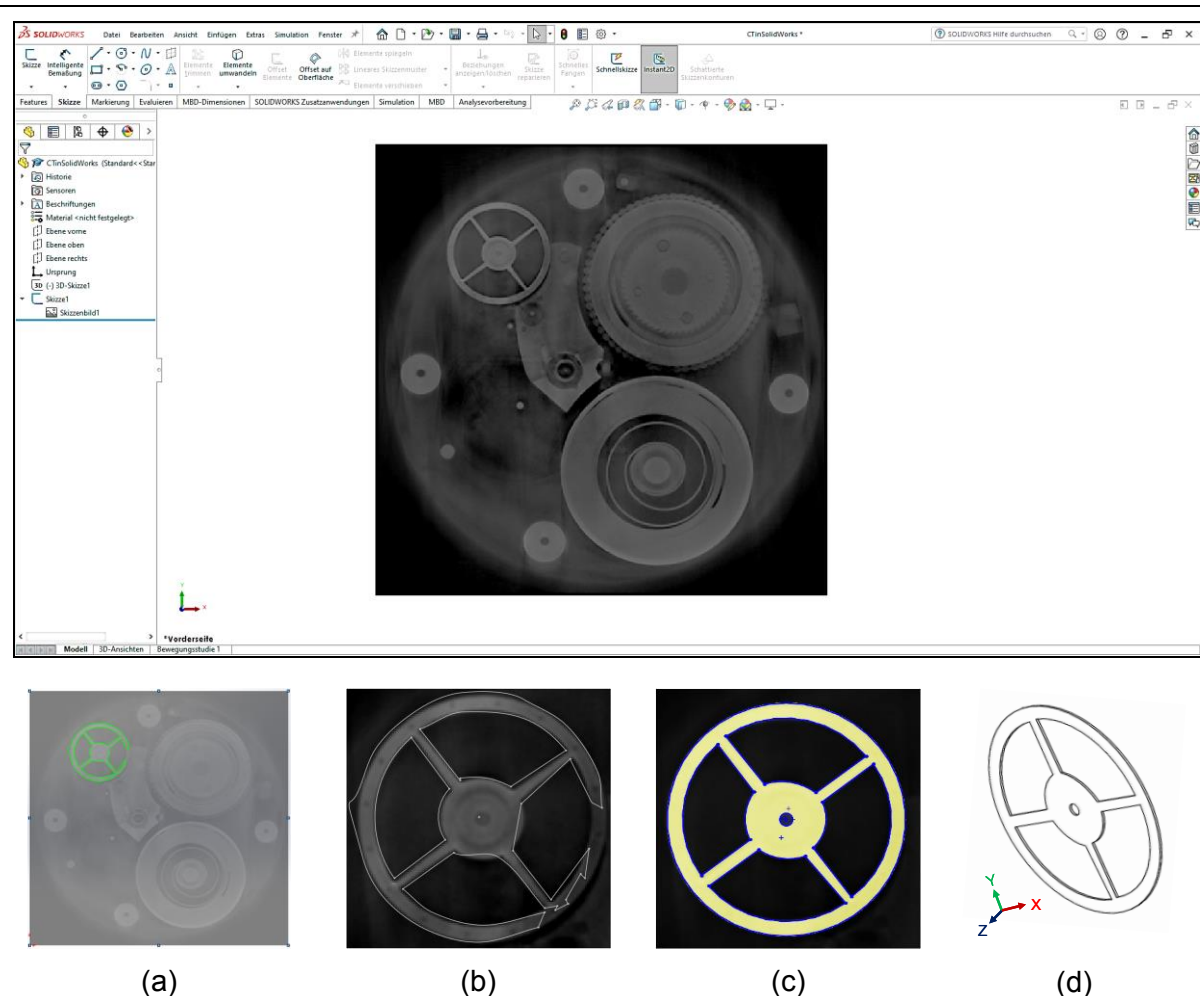


Abbildung 2-19: Konturverfolgung im CAD-System SOLIDWORKS® (Version 2020) am Beispiel einer CT-Schichtbildsequenz - Gesamtübersicht (Abbildung a-d verkleinert): (a) Initiieren der Verfolgung durch Selektieren der Region, (b) Ergebnis Konturverfolgung, (c) vollständige Skizzengeometrie, (d) dreidimensionales Bauteil (Isometrische Ansicht)

Bei der Verwendung von Bilddaten in CAD-Systemen werden grundsätzlich nur die visualisierten zweidimensionalen Informationen genutzt. Ein Zugriff auf primär räumliche Objekteigenschaften der Schichtbildsequenz ist nicht möglich. Dabei limitiert auch die gewählte Perspektive potenziell die Ansicht. Somit sind Objekte, die nicht vollständig in der vorliegenden Schicht abgebildet sind oder durch andere verdeckt werden nur unvollständig interpretierbar.

2.3 Prozessuale und technische Analyse

Im folgenden Abschnitt werden die vorgestellten Prozessketten und einzelnen Methoden aus dem Stand der Technik validiert. Dies erfolgt einerseits anhand einer Gegenüberstellung verfügbarer kommerzieller Systeme zur Verarbeitung computertomographischer Daten. Andererseits anhand eines exemplarischen Beispiels, bei dem alle Prozessketten methodisch verglichen werden.

Validierung aktuell verfügbarer CT-Software

Zur Verarbeitung computertomographischer Daten stehen heutzutage verschiedene kommerzielle Softwaresysteme zur Verfügung, deren funktionell breites Spektrum vorrangig den industriell-technischen oder medizinischen Bedarf reflektiert. In Tabelle 2-3 werden vier exemplarische Vertreter mit ihrem jeweiligen Funktionsumfang vorgestellt. Dabei sind zwei Systeme (VOLUME GRAPHICS und AVIZO®) vorrangig industriell und zwei weitere (SIMPLEWARE® und MATERIALISE) überwiegend medizinisch anwendbar [64, 81-83].

Die Verarbeitung computertomographischer Daten erfolgt mit jedem System in vergleichbarer Abfolge, die sich im Wesentlichen an der in Abschnitt 1.2 erläuterten Prozesskette orientiert. Nach Auswahl und Import der Schichtbilder erfolgt mittels diverser zwei- oder dreidimensionaler Visualisierung eine Objektselektion mit anschließender Segmentierung, für welche wiederum zahlreiche technische Umsetzungen existieren. Das aktuell vorrangig eingesetzte Segmentierungsverfahren ist die schwellwertbasierte Oberflächenbestimmung, aus der das dreidimensionale Polygonmodell hervorgeht. Die so generierten Modelldaten können zur weiteren Nutzung in verschiedenen standardisierten Formaten exportiert werden. Alle genannten Systeme verarbeiten performant große Datenmengen. Abbildung 2-20 zeigt anhand der aktuellen Prozesskette jeweils die gemeinsame Schnittmenge aller verfügbaren Funktionen in den analysierten Systemen.

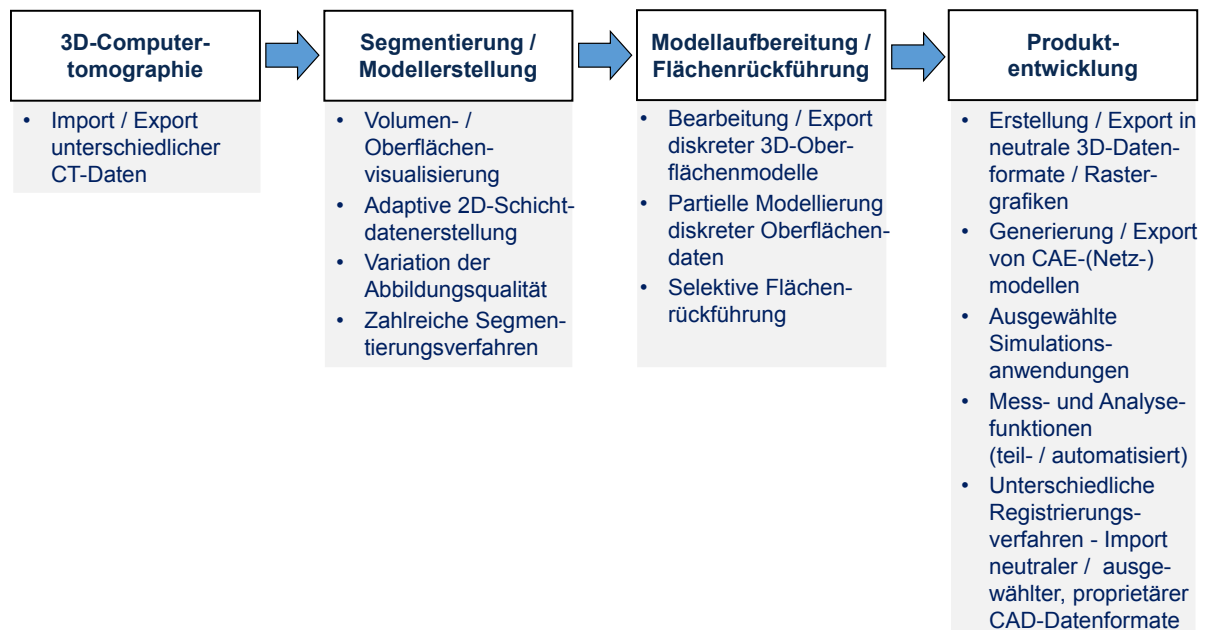


Abbildung 2-20: Funktionsumfang getesteter Systeme in den Schrittfolgen der Prozesskette [64, 81–83]

Tabelle 2-3: Übersicht ausgewählter proprietärer Systeme zur Verarbeitung von CT-Daten

Hersteller Name	SYNOPTIS® Simpleware® ScanIP [82]	THERMO SCIENTIFIC Avizo® [81]	VOLUME GRAPHICS VGStudio Max [64]	MATERIALISE Mimics Innovation Suite [83]
Version	2019.09	9.7 (2020.2)	3.3.2	MIMICS RESEACH 23
Import				
Bilddaten	DICOM® RAW Rastergrafiken (z.B. JPEG)	DICOM® / DICONDE RAW Rastergrafiken (z.B. JPEG)	DICOM® / DICONDE, RAW Rastergrafiken (z.B. JPEG)	DICOM® / DICONDE RAW Rastergrafiken (z.B. JPEG)
Oberflächen Geometrien	STL STEP	STL STEP, CATIA	STL STEP, CATIA, CREO®	STL IGES, CATIA, CREO®
CAE-Daten	ANSYS®, ABAQUS, NASTRAN	k. A.	PATRAN®, NASTRAN	NASTRAN, ANSYS®
Export				
Bilddaten	DICOM®, RAW Rastergrafiken (z.B. JPEG ²⁶)	DICOM®, RAW Rastergrafiken (z.B. PNG)	DICOM®, RAW Rastergrafiken (z.B. TIFF)	DICOM® Rastergrafiken (z.B. BMP)
Oberflächen Geometrien	STL IGES, STEP, CATIA	STL DXF, OPEN INVENTOR®	STL IGES, STEP	STL IGES
CAE-Anwendungen	ANSYS®, ABAQUS, MATLAB®	ABAQUS, FLUENT®, MATLAB®	PATRAN®, NASTRAN	ANSYS®, ABAQUS, NASTRAN
Funktionen				
	Funktionen zur Flächenrück- führung Erstellung / Export von FE- Netzen für Simu- lationen	Bildregistrierung KI-Algorithmen zur Analyse und Seg- mentierung	Performante Volu- menvisualisierung Zahlreiche Analyse- funktionen Referenz- und Geometrie- erzeugung und Flächenrück- führung	Kombinierte Modell- und Volumenbild- Darstellung Werkzeuge für die Modellierung von Freiformflächen automatische Flächenrück- führung

²⁶ JPEG: JOINT PHOTOGRAPHIC EXPERTS GROUP

Um aus den Ergebnisdaten analytische Modelldaten zu erstellen, muss bei AVIZO® ein zusätzliches Softwaresystem zur Flächenrückführung eingesetzt werden. Bei allen anderen Systemen können entweder selektiv oder automatisiert NURBS-Flächen und schließlich vollständige Volumenmodelle erstellt werden. Diese sind dann als neutrale Datenformate exportierbar. Abbildung 2-21 zeigt exemplarisch die Möglichkeiten der Flächenvariation bei SIMPLEWARE®.

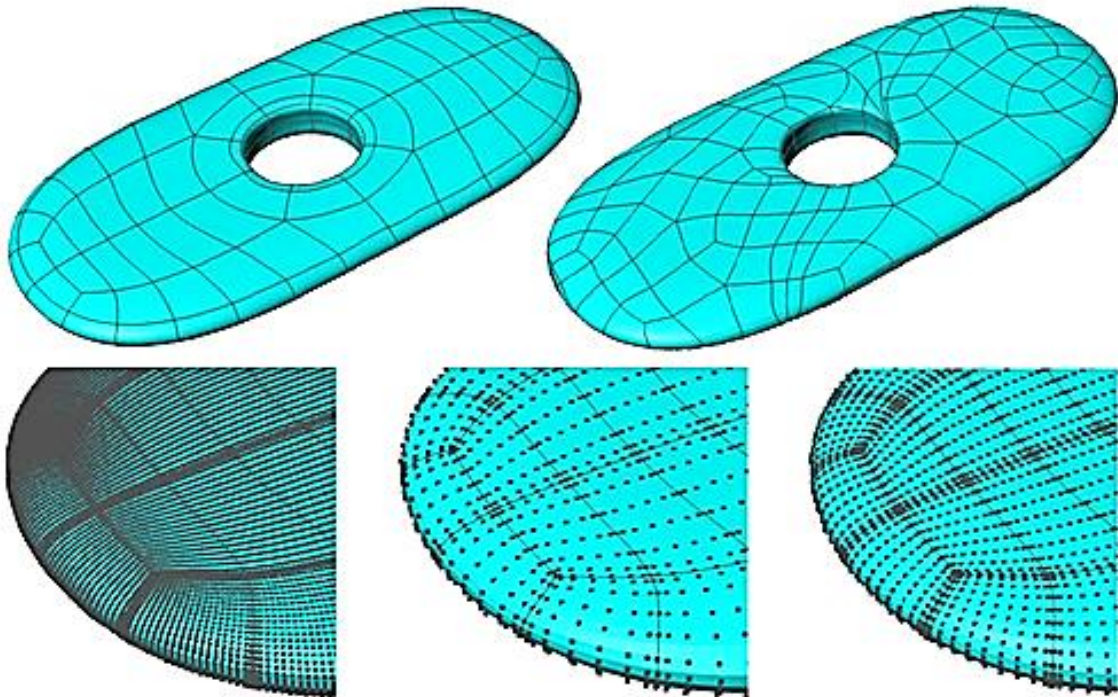


Abbildung 2-21: Flächenvariation bei der NURBS-Erstellung mit SIMPLEWARE® [84]

Weiterhin verfügt SIMPLEWARE® über eine transformierende Schnittstelle mit dem CAD-System SOLIDWORKS® [85]. Diese ermöglicht es,

- analytische Daten aus SOLIDWORKS® in SIMPLEWARE® zu übertragen,
- Änderungen am CAD-Modell aus SOLIDWORKS® zu synchronisieren,
- diskrete Oberflächenmodelle in SOLIDWORKS® zu übertragen oder
- Landmarken und Maßbezüge aus SIMPLEWARE® in SOLIDWORKS® zu übertragen.

Bezüglich der vorliegenden Zielstellung dieser Arbeit ergeben sich folgende Defizite:

- Fehlende digitale Durchgängigkeit der Prozesskette
- Datenübertragung durch reine Synchronisation
- Keine systematische, direkte Interaktion
- Begrenzte Übertragbarkeit selektiver Objektmerkmale und segmentierter dichtebasierter Oberflächenmodelle

Validierung aktueller Prozessketten

An einem technischen Beispiel erfolgt zur Validierung eine systematische Fehleranalyse. Dabei handelt es sich um die bereits benannte historische Taschenuhr, deren Räderwerk rekonstruiert werden soll. Der Datensatz liegt in einem klassischen und kompatiblen Bilddatenformat vor. Alle zur Datenverarbeitung notwendigen Informationen sind verfügbar. Neben den bekannten Prozessfolgen aus Abbildung 2-8 (S.13) erfolgt zusätzlich eine Modellierung unter direkter Nutzung einzelner Schichtsequenzen im CAD-System [86]. Daraus ergeben sich folgende Varianten, die in Tabelle 2-4 mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen gegenübergestellt sind:

- (#1) Ableiten der Bauteile über Methoden der Bildverarbeitung [87]
- (#2) Grauwert- bzw. Schwellwertbasierte Oberflächenextraktion [88]
- (#3) Methoden der Bildanalyse durch Messen und Nachmodellieren [89]
- (#4) Direkte Nutzung einzelner Schichtbilder im CAD-System [87]

Tabelle 2-4: Vergleich aktueller Prozessketten mit ihren Vor- und Nachteilen

Varianten	#1	#2	#3	#4
<i>Vorteile</i>	Zahlreiche Methoden Verfügbar	Funktioniert und industriell etabliert	Flexibel und universell einsetzbar	Unmittelbare Modellierung möglich
	Vielfältige Objektstrukturen (diskret, analytisch) möglich	In zahlreichen kommerziellen Systemen integriert	Grundfunktionen in vielen Systemen vorhanden	Analytische und parametrische Modellstruktur vorliegend
<i>Nachteile</i>	Mehrstufige Prozesskette	Sequentielle Abfolge	Numerische Ergebnisse / manuelle Weiterverarbeitung	Keine Sequenzverarbeitung möglich
	Anwendung setzt umfangreiche Kenntnis voraus	Diskrete Modellstrukturen sind mehrdeutig interpretierbar	Ungenauigkeiten infolge manueller Selektierung	
	Methodisch limitiertes Endergebnis	Aufwändige manuelle Nachbearbeitung erforderlich	Zweidimensionale Bearbeitung verhindert eine eindeutige Objektanalyse und Skalierung	

Die exemplarische Anwendung erfolgt anhand von unterschiedlichen Bestandteilen der Mechanik, welche im Folgenden beschrieben werden.

Variante 1 (#1) erzielt durch diverse Methoden der Bildverarbeitung, wie etwa der Kantenerkennung und der Objektbestimmung ein vorläufiges Ergebnis. Jedoch ist deren Genauigkeit anwenderseitig schwer verifizierbar (Abbildung 2-22). Für eine Anwendung als diskrete oder

analytische Objektstruktur im CAD-System sind demnach objekt- und methodenspezifische Vor- und Nachbereitungsschritte erforderlich.

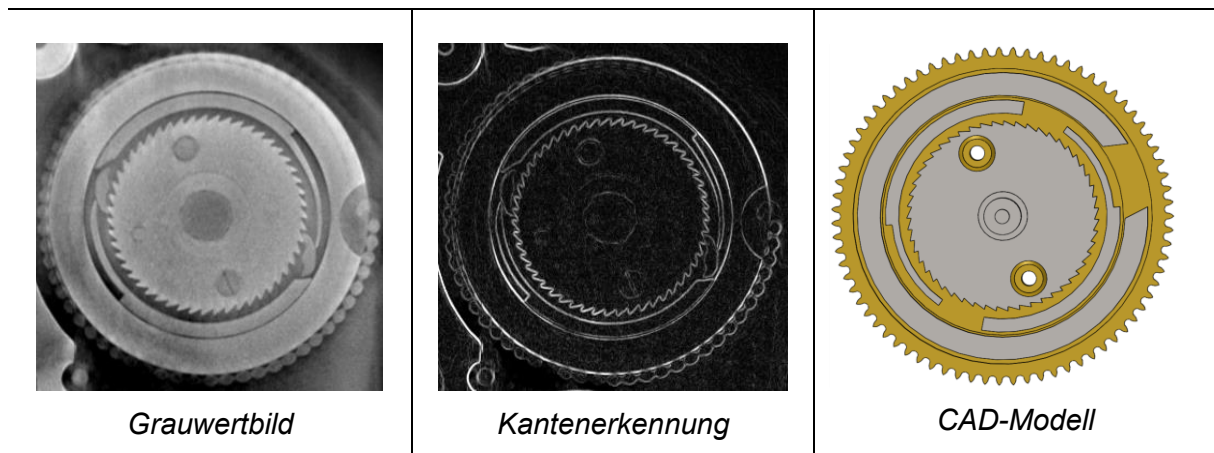


Abbildung 2-22: Vergrößerter Ausschnitt einer Schichtbildsequenz der Schnecken-Baugruppe - Grauwertbild als Ansicht von unten (links), Anwendung der Kantenerkennung mit einem CANNY-Operator (mitte), Partiiell rekonstruiertes CAD-Modell (rechts)

Über die grauwertbasierte Oberflächenextraktion (#2) kann ein Objekt gezielt abgeleitet werden. Liegen mehrere Objekte innerhalb der Schwelle, werden diese ebenfalls extrahiert. Sind die Objekte funktionell miteinander verbunden, kann es zu ungewünschten Verbindungen (z.B. vermeintlicher Stoff- anstatt Kraftschluss) kommen. Ist aufgrund der materiellen Zusammensetzung kein eindeutiges Objekt ableitbar, können unvollständige Objekte entstehen. Folglich sind essenzielle Nachbearbeitungsschritte notwendig (Abbildung 2-23).

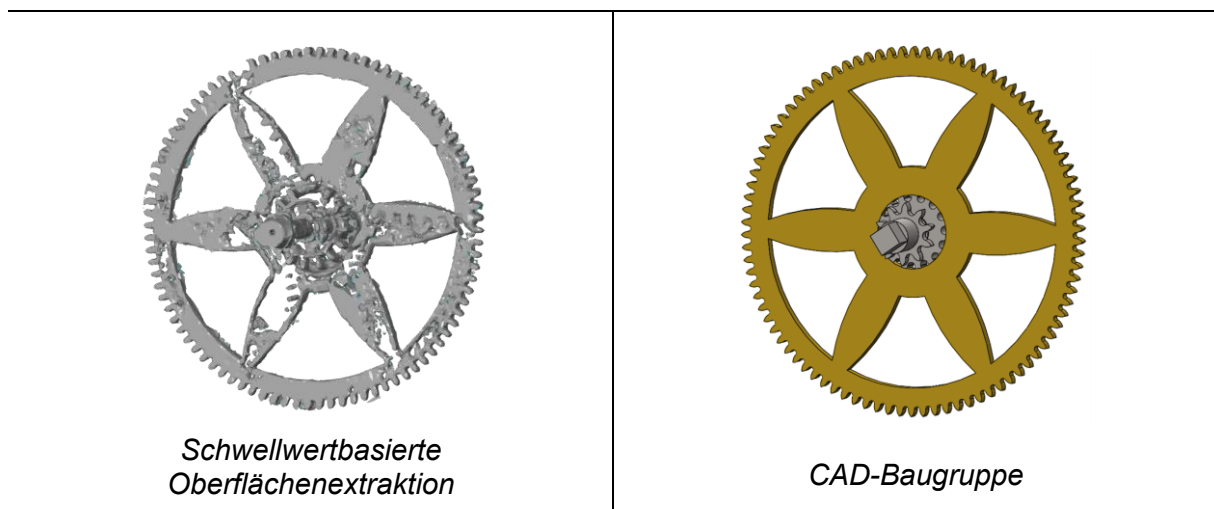
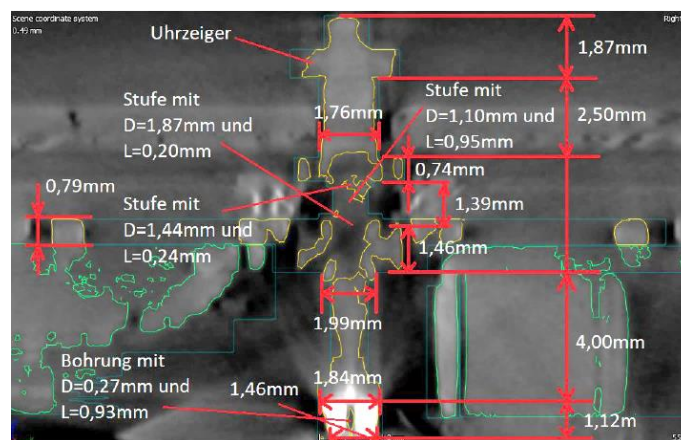


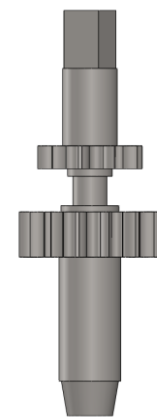
Abbildung 2-23: Minutenrad-Baugruppe als einzelnes Objekt mit Aussparungen (links) und vollständig rekonstruiert (rechts)

Bei der Anwendung von Methoden zur Bildanalyse (#3) können vom einfachen Bildverarbeitungssystem bis zum CAD-System zahlreiche Softwarewerkzeuge zum Einsatz kommen (Abbildung 2-24). Eine diesbezügliche Grundauswahl ist in vielen Systemen enthalten. Für ihre erfolgreiche und zielführende Anwendung ist jedoch eine einheitliche Skalierung erforderlich.

Zudem erschweren die begrenzte zweidimensionale Ansicht und somit fehlende räumliche Informationen eine vollständige Objektcharakterisierung.



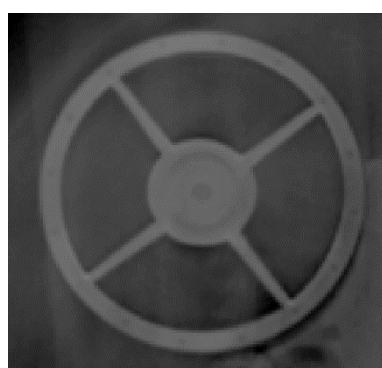
Schichtbild mit numerischen Objektmerkmalen



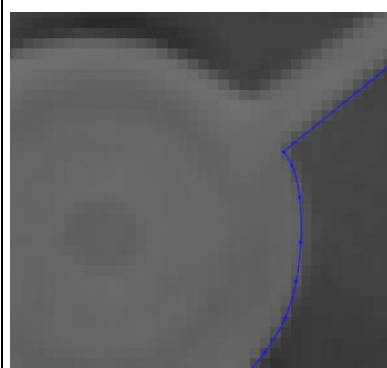
CAD-Modell

Abbildung 2-24: Erfassen der Parameter des Minutensradtriebes über Messfunktionen (links), Rekonstruiertes Volumenmodell (rechts) [88]

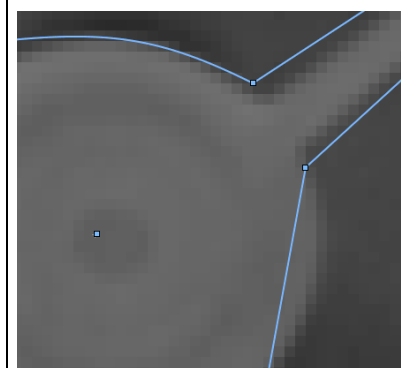
Variante 4 ergänzt neben der in Abschnitt 2.2.5 bereits am Beispiel erläuterten Form über eine Objekterkennung die direkte Modellierung mit Bilddaten (#4). Grundlegend sind bei diesem Ansatz ohne eine genaue Kenntnis zu Voxelgröße und Skalierungsfaktoren (z.B. Bildmaßstab) numerische Zusammenhänge nicht ableitbar. Ebenso ergeben sich Abweichungen infolge manueller Selektionen. Dabei kann der exakte Übergangspunkt zur Gradienten-Bestimmung bzw. zur Konturverfolgung nur näherungsweise detektiert werden. Durch die direkte Nutzung computertomographischer Daten als klassische Bilddaten unmittelbar im CAD-System sind hingegen aufwendige Vor- und Nachbearbeitungsschritte vermeidbar. Ebenso wird mit der CAD-assoziierten Modellierung das entsprechende Ergebnis schneller und somit effizienter erreicht, vorwiegend jedoch unvollständig.



*Schichtbild
(Auszug)*



*Modellierungsmodus
(Vergrößert)*



*Ergebnis
Konturverfolgung
(Vergrößert)*

Abbildung 2-25: Direkte Modellierung auf Bilddaten am Beispiel des Gangrades

Grundsätzlich existieren zahlreiche Verfahren mit jeweils individuellen Vor- und Nachteilen für die Nutzung computertomographischer Daten in der Produktentwicklung. Jeder der analysierten Prozesse verwendet primär selektive Informationen. Bei der schwellwertbasierten Oberflächenextraktion (#2), einem funktionell robusten und industriell etablierten Verfahren sind dies vor allem Grauwertbereiche, bei kantenbasierten Segmentierungsverfahren (#1) Gradienten und bei der Bestimmung charakteristischer Objektmerkmale (#3 und #4) diverse geometrische Objektgrößen. Dabei zeigt sich bei allen Prozessketten durch die essenzielle Konvertierung zwangsläufig ein Verlust an Information und Genauigkeit. Ebenso gibt es bei nahezu allen Verfahren weder Rekursionen noch Interaktionen mit den Originaldaten. Um einen vormals erreichten Bearbeitungsstand wiederherzustellen, müssen methodisch alle vorausgegangenen Schritte erneut durchlaufen werden. Mit Ausnahme der grauwertbasierten Oberflächenextraktion erfolgen sämtliche weiteren Verfahren primär zweidimensional oder mit optional dreidimensionaler Erweiterung. Dies führt vor allem zu Defiziten bei der Analyse und Separierung von Objekten. Im gleichen Zusammenhang sind auch perspektivische Verzerrungen oder präzise topographische Objektausrichtungen nur eingeschränkt objektivierbar. Darüber hinaus werden durch eine selektiv zweidimensionale Darstellung unterschiedliche Skalierungen angewandt, die algorithmisch in einer fehlerhaften quantitativen Analyse resultieren. Begrenzte Ansichtsoptionen können durch perspektivisch verdeckte Objekte, mechanische Verbindungsarten oder Sequenz-übergreifende Bauteile entstehen. Dabei ist der darauffolgende Informationsverlust entsprechend signifikant. Allen Prozessketten gleich ist somit eine förmlich subjektive Anwendung von Methoden und Werkzeugen.

Zusammenfassend können folgende prozessuale Defizite aktueller Vorgehensweisen und deren Methoden zur Nutzung computertomographischer Daten in der Produktentwicklung abgeleitet werden:

- Begrenzte Objektansichten durch unzureichende oder sequenzielle Visualisierungen
- Methodische Limitierung auf einzelne ausgewählte Objektinformationen
- Unzureichende Eingrenzung relevanter Objektbereiche und Informationen

Zugleich bestätigen sich jeweils die in der Problemstellung aus Abbildung 1-2 abgeleiteten Nachteile über alle Verfahren, wie ein

- Methodisch variabler, mehrstufiger sequentieller Ablauf, der grundsätzlich mit einem
- Informationsverlust durch Konvertierung in etablierte oder standardisierte Datenformate und einem
- Genauigkeitsverlust durch Generierung unterschiedlicher Modellformen

gekennzeichnet ist. Der potenzielle Einsatz etablierter CT-Software bei der Anwendung computertomographischer Daten in Produktentwicklungsprozessen wird durch eine methodisch limitierte Auswahl reflektiert. Zudem vervollständigen funktionelle Schwächen aktueller CAD-Systeme, wie geeignete Verfahren zur universellen Bilddatenanwendung (z.B. Selektierungs- und Segmentierungsverfahren) oder bei der Volumendatenvisualisierung (z.B. Stapelverarbeitung) die technischen Begrenzungen.

Folglich kann sowohl methodisch als auch technisch ein systematisches Problem identifiziert werden.

3 Computertomographische Daten in der CAD-Umgebung

3.1 Das Konzept

3.1.1 Definition der Rahmenbedingungen

Der Anwender des zu entwickelnden Prozesses ist der Produktentwickler respektive der Konstrukteur. Die Ausgangsbedingungen der Digitalisierung sind ihm meist nicht hinreichend bekannt. Jedoch müssen vor Entwicklung und Nutzung einer Prozesskette grundsätzliche Anwendungsbedingungen definiert sein. Dazu werden nachfolgende Einflussfaktoren abgegrenzt, die Auswirkungen auf die computertomographische Datenqualität und dadurch den folgenden Prozess haben. Diese sind wie folgt klassifizierbar (Abbildung 2-4):

- Hardwareseitige Parameter
- Bedienerdefinierte Faktoren
- Objektbezogene Parameter
- Nachbereitung / Auswertung

Hardwareseitige Parameter sind bautechnische CT-Komponenten, die angewandten Aufnahmebedingungen (z.B. Fixierung und Ausrichtung des Objektes) und Prozessparameter (z.B. Leistung der Röntgenröhre) sowie verschiedene bildkorrigierende Faktoren (z.B. Filter), die für den Konstrukteur nicht beeinflussbar und somit gegeben sind.

Bei medizinischer Anwendung gilt der Facharzt für Diagnostische Radiologie als Bediener des Computertomographen und Verantwortlicher des Aufnahmeprozesses. Industrieller Bediener ist die Fachkraft für Durchstrahlungsprüfung [90, 91]. Beide definieren sämtliche Erfassungsparameter und sind somit verantwortlich für eine problemspezifische Geräteeinrichtung. Die leitliniengerechte Positionierung der Patienten oder Objekte ist auch eine vorrangige Aufgabe des Bedieners.

Ebenso beeinflussen auch objektbezogene Parameter die Qualität der Ergebnisdaten. Objekte können aus medizinischer oder industrieller Erfassung vorliegen. Ihre computertomographische Erfassung erfolgt unter statischen Bedingungen. Dynamische computertomographische Messungen (4D-CT) betrachten eine erweiterte Problemstellung und zusätzliche Parameter (z.B. Kraft, Temperatur), die während der Erfassung auf das Objekt einwirken. Somit wird eine komplexere Ausgangssituation erzeugt. Für die vorliegende Arbeit werden diese Randbedingungen ausgeschlossen. Es werden ausschließlich 2D- / 3D-CT betrachtet [28, 30]. Dafür kann die Orientierung der erfassten Objekte im Raum beliebig und ohne definierte Ausrichtung

sein. Objektbezogene Parameter integrieren auch eine Formvariabilität. Das heißt, die geometrische Gestalt und Komplexität sind vom Anwender nicht beeinflussbare Gegebenheiten. Unbedingt vorausgesetzt werden jedoch feste Dimensionen (starr) der Objekte. Die Abbildung erfolgt ohne Verdrehungen und perspektivische Verzerrungen, unabhängig von ihrer Anzahl oder Form.

Die ausgewählten computertomographischen Schichtsequenzen entsprechen der in Abschnitt 2.1.2 erfolgten Definition von CT-Daten. Für eine Auf- und Nachbereitung liegen ihre bildbasierten Eigenschaften vor. Essenzielle Parameter dafür sind die Größe (Anzahl der Voxel einer Schicht), die Voxelgröße und die Grauwerttiefe. Gemeinsam charakterisieren sie kombinatorisch das diskrete Volumenmodell und somit das Voxelvolumen. [35–38, 40]

Folglich können Art und Qualität der Ergebnisdaten sehr variabel sein. Ebenso verfügen dreidimensionale computertomographische Daten innerhalb der Prozesskette über eine quantitativ variable Größe und Auflösung. Qualitativ hingegen müssen sie die Anforderungen der jeweils vorliegenden Aufgabenstellung erfüllen.

Abbildung 3-1 verdeutlicht exemplarisch eine Auswahl gegebener Randbedingungen.

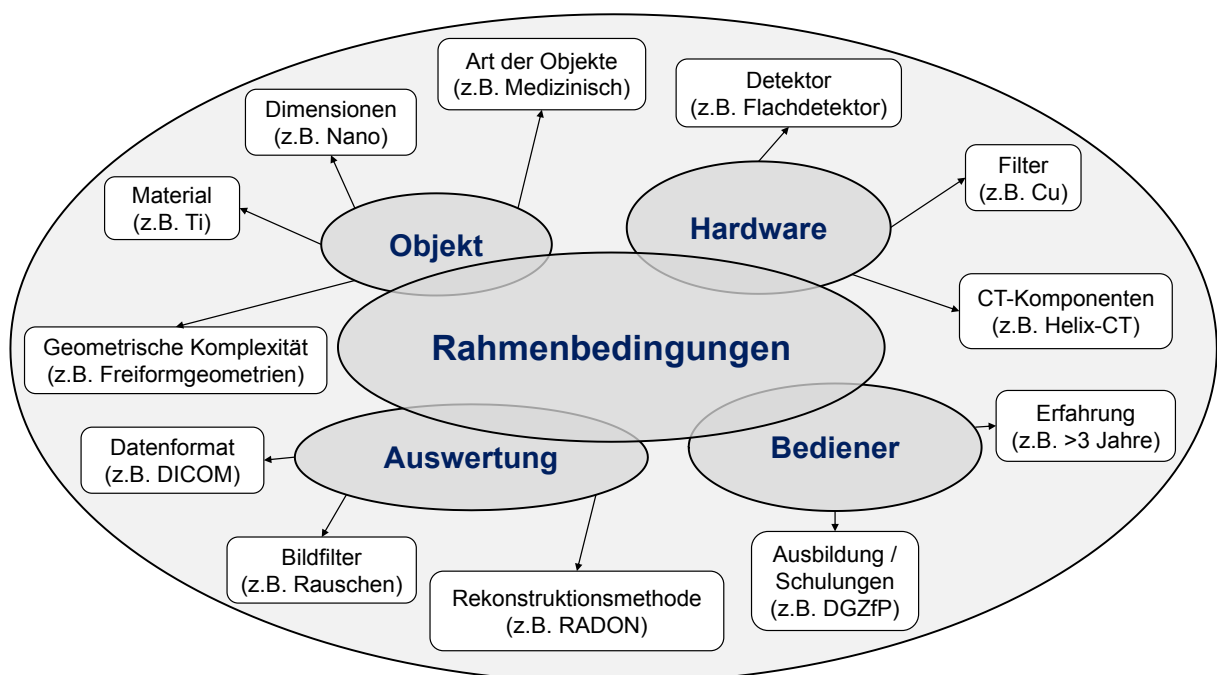


Abbildung 3-1: Exemplarisch gegebene Einflussfaktoren auf den Prozess

3.1.2 Anforderungen an die Prozesskette

Die vorliegende Arbeit will dem Konstrukteur Lösungswege für Neu- und Änderungskonstruktionen bei individuellen Fragestellungen ermöglichen. Schnittstellen zu anderen Branchen wie der Medizin sind dabei ebenso möglich. Grundsätzlich sollten jedoch hinreichende Informationen zum Objekt oder zur Problemstellung vorgegeben sein. Alternativ kann auch ein bereits virtuell generiertes Modell (Soll-Modell) vorliegen.

Der Konstrukteur als eigentlicher Anwender des Verfahrens nutzt fachspezifische (z.B. analytische Vorgehensmodelle, systematische Bewertungsverfahren) und fachunspezifische (z.B. Problemlöse- und Kreativitätstechniken, Soft Skills) Prinzipien zur Bearbeitung komplexer technischer Problemstellungen [92–94]. Eine weitere Voraussetzung ist demnach auch ein geschulter Umgang mit CAD- und CAE-Werkzeugen aus der Produktentwicklung [16, 95].

Dieser zu entwickelnde Prozessablauf sollte sich einerseits an die typischen Vorgehensweisen zur Erstellung einer Konstruktion anlehnen und dabei andererseits mit CAD-Systemen realisierbar sein. Somit ist eine wesentliche Aufgabe der Arbeit ein Konzept zu entwickeln, um alle in computertomographischen Daten enthaltenen Informationen visualisieren und steuern zu können. Zudem sollte während des gesamten Prozesses ein kontinuierlicher Zugriff gewährleistet sein. Basierend auf den Ergebnissen der prozessualen und technischen Analyse (Abschnitt 2.3) ergeben sich somit folgende methodische Schwerpunkte:

- Eine systemunabhängige Darstellung aller genannten Visualisierungsformen
- Der Einsatz steuernder und korrigierender Verfahren zur Erkennung und Eliminierung von Abbildungsfehlern
- Abläufe zur definierten Ausrichtung oder Registrierung auf in den Daten enthaltene Objektinformationen
- Verfahren zur gezielten, individuellen Eingrenzung von Objektbereichen bzw. zur Erfassung von Objektinformationen
- Methoden, für eine gezielte Auswahl und Variation der computertomographischen Objektinformationen und somit der einzelnen Repräsentationsformen

Aus den erläuterten Anforderungen, welche sich aus der genannten Zielstellung und einer Analyse aus dem Stand der Technik ergeben, müssen einerseits die computertomographischen Daten und deren Möglichkeiten zur Be- und Verarbeitung und andererseits die systematische Funktionalität von CAD-Systemen betrachtet werden.

3.1.3 Objektinformationen aus CT-Daten

Prinzipiell können CT-Daten in vielfältigen Formaten vorliegen. Alle Eigenschaften computertomographischer Daten resultieren aus der Definition ihrer Anforderung und liegen somit immer vor, unabhängig davon, ob die Daten als Bild- oder Metadaten vorkommen. Die Eigenschaften des einzelnen Voxels bilden die Grundlage weiterer Betrachtungen. Ausgehend davon können sämtliche Merkmale einzelner Schichtbilder und ganzer Schichtbildsequenzen bestimmt werden. Somit ist es möglich, resultierend aus den Erkenntnissen in Abschnitt 2.1, direkt Rückschlüsse auf Materialstrukturen, Objekteigenschaften und topologische Zusammenhänge von Objektstrukturen zu ziehen [30].

Tabelle 3-1 kategorisiert die wesentlichen Eigenschaften computertomographischer Daten. Aus den Dichteigenschaften können materielle Beschaffenheiten abgeleitet werden. Über die Größe einzelner Voxel und ihrem Verhältnis zur jeweiligen Schichtbilddimension kann ein Bezug zur Skalierung und damit zur Größe der einzelnen Objekte hergestellt werden. Position und Orientierung der Objekte innerhalb der Datenstruktur ergeben sich aus ihrer Stellung und Transformation innerhalb des Bildstapelkoordinatensystems.

Tabelle 3-1: Bestandteile der Struktur von CT-Daten und deren Eigenschaften

CT-Daten-Struktur	Eigenschaften
Voxel	<ul style="list-style-type: none"> • Grauwert • Größe • Position
Schichtbild	<ul style="list-style-type: none"> • Schichtdimension (Anzahl der Voxel in Bildebene) • Jeweilige Nummer²⁷ / sequentielle Abfolge • Eindeutige Position und Orientierung im Raum
Schichtbildsequenz - Voxelvolumen	<ul style="list-style-type: none"> • Schichtbildanzahl • Alle Eigenschaften der einzelnen Schichtbilder

Um präzise und quantifizierbare Objekteigenschaften aus computertomographischen Daten abzuleiten, werden zusätzliche Methoden und Messwerkzeuge benötigt. Es erfolgt somit eine indirekte Abbildung der Objektinformationen. Diese können als diskrete, analytische oder numerische Eigenschaften der digitalisierten Objekte und somit als Repräsentationsform generiert und dargestellt werden.

Tabelle 3-2 zeigt eine Übersicht der Objekteigenschaften, die direkt und indirekt aus computertomographischen Daten ermittelt werden können. Der Anteil indirekter Eigenschaften ist hierbei lediglich ein Auszug, weil vor allem die bekannten Segmentierungsverfahren die Varianz verfügbarer Methoden aufzeigen. Bis zur Erkennung und Kennzeichnung einer spezifischen Objekteigenschaft als Objektstruktur können, wie bereits angedeutet, weitere Verfahren folgen, die unterschiedliche Hierarchien in der Bildverarbeitung einnehmen [53].

Tabelle 3-2: Übersicht zu Objekteigenschaften, die aus CT-Datenstrukturen ableitbar sind

Direkte Objekteigenschaften	Indirekte Objekteigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> • Dichte eines Materialbereiches (Grauwert) • Skalierung / Objektgröße (Voxelgröße) • Position und Orientierung - innerhalb der Datenstruktur und zu anderen Objekten im Voxelvolumen (Position) 	<ul style="list-style-type: none"> • Freigeformter analytischer Kantenverlauf (z.B. Spline) • Diskrete topologische Kontur (z.B. Kreis) • Oberflächenmodell (z.B. Polygon) • Analytisches Flächenmodell (z.B. NURBS) • Abstand zweier Objekte (z.B. Länge)

²⁷ Diese Angaben liegen nur bei DICOM® und DICONDE vor.

3.1.4 Voraussetzungen in CAD-Systemen

Um computertomographische Daten über CAD-Systeme in alltägliche Prozesse des Konstrukteurs einzubinden, müssen diese Abläufe und deren Voraussetzungen zunächst bekannt sein. Nur so können sie adäquat und systemspezifisch mit den technischen Eigenschaften von CAD-Systemen verbunden werden.

Bezugnehmend auf die definierten Anforderungen und folglich den perspektivischen Anwendungsszenarien liegt bei Änderungskonstruktionen bereits ein virtuelles CAD-Modell vor. Dies kann grundsätzlich als Modellierungsgrundlage angesehen werden. Bei einer Neukonstruktion hingegen wird im Zuge des Modellierungsprozesses ein erster digitaler Entwurf erstellt. Notwendig dafür sind geometrische Informationen zum Bauteil und seinen strukturellen Dimensionen im Sinne von Objektmerkmalen. [26]

Die systematische Vorgehensweise zur Bearbeitung konstruktiver Problemstellungen wird in CAD-Systemen über die Schrittfolge zur Einzelteilmodellierung (Abschnitt 2.2.4), das heißt zur Erstellung der analytischen Modellform gegeben. Ausgehend von einer primär zweidimensionalen Skizzengeometrie wird parametrisch ein Volumenkörper modelliert.

Dafür sind die nachfolgenden Voraussetzungen und Funktionsbausteine gegeben, die unabhängig von der Problemstellung für zwei- oder dreidimensionale Modellierungen aller gängig angebotenen CAD-Systeme nutzbar sind [25, 26]:

- Konstruktions- und Modell-Koordinatensysteme, die jeweils eine eindeutige Position des zu erstellenden Objektes bestimmen
- Definierte Basen (2D- und 3D-Skizze) als Konstruktionsachsen oder Referenzebenen
- Zeichenfunktionen zur Erstellung von Objektstrukturen und Objektmerkmalen mittels
 - geometrischer Primitive wie Punkte, Linien oder Kreise sowie Funktionen zur Generierung von räumlichen Objektbereichen (z.B. Extrusion und Rotation),
 - Skizzierfunktionen zur Erzeugung analytischer Kurven (z.B. Spline) oder Flächen (z.B. NURBS), die schließlich einen Volumenkörper abbilden (z.B. Sweeping²⁸)
- Beziehungen (z.B. parallel, koaxial) und Zusammenhänge (z.B. Referenzen, Maßbezüge) der einzelnen Konstruktions- und Geometrieobjekte
- Bereits vorhandene geometrische Feature-Elemente (z.B. Bohrungen, Nuten)

Wichtige Bestandteile von CAD-Systemen zum Austausch und zur Nutzung digitaler Informationen (z.B. Objektmerkmale) und Daten (z.B. Objektstrukturen) sind ihre Schnittstellen [14]. Diese werden grundsätzlich in Direktschnittstellen, neutrale Datenschnittstellen und Programmierschnittstellen eingeteilt. Direktschnittstellen verfügen über die Eigenschaft, Konstruktionen mit ihren Historien, ihren verwendeten Referenzen und erzeugten Abhängigkeiten von einem CAD-System auf ein anderes übertragen zu können. Nahezu alle gängigen Hersteller verwenden ähnliche Modellierkerne, wodurch methodisch ein einfacher und effektiver Datenaustausch möglich ist [14]. Somit verfügen auch so gut wie alle CAD-Systemanbieter über Direktschnittstellen, die jedoch vorrangig innerhalb der eigenen Produktfamilien zielführende

²⁸ Volumenerstellung durch Verschieben eines zweidimensionalen Profils entlang einer beliebigen Kurve [14].

Anwendung finden [96]. Neutrale Datenschnittstellen können normierte und industriestandardisierte Datenformate verarbeiten. Dadurch wird eine universelle Übertragbarkeit auf andere CAD- und CAE-Werkzeuge in der Produktentwicklung garantiert. Unter Beachtung aktuell verfügbarer CAD-Systeme sind dies Schnittstellen zu folgenden Datenformaten und deren Beschreibungsformen [65, 77–79]:

- Analytische Volumenmodelle in Form neutraler Datenformate (z.B. JT)
- Einzelne planare Geometrien, Kurven und Konturen (z.B. DXF)
- Dreidimensionale diskrete Oberflächenbeschreibungen (z.B. STL)
- Skizzen, Zeichnungen oder Fotografien in Form von Rastergrafiken (z.B. PNG)
- Punktdaten oder -wolken (z.B. TXT²⁹)

Neben den Schnittstellen zum Zugriff auf direkte und neutrale Datenformate gibt es bei etablierten kommerziellen CAD- und CAE-Systemen Programmierschnittstellen (API³⁰), die zur Erstellung nutzerspezifischer Funktionsbausteine diverse Softwarewerkzeuge beinhalten. Diese können über systemseitig vorhandene Funktionen oder externe Quellen (z.B. Frameworks³¹) umgesetzt werden [65, 77–79].

3.2 Der Entwurf des Gesamtprozesses

Der Gesamtprozess besteht aus zwei formell voneinander unabhängigen Umgebungen (Abbildung 3-2), eine Umgebung zur Initialisierung und Verwaltung computertomographischer Daten und zweitens eine CAD-spezifische Umgebung. Beide sind interaktiv über einen dritten Baustein der Überführung und Interpretation miteinander verbunden. Darüber hinaus umfasst die Prozesskette eine Kommunikations- und Interaktionsebene, die über systematische Beziehungen beide Umgebungen miteinander verbindet.

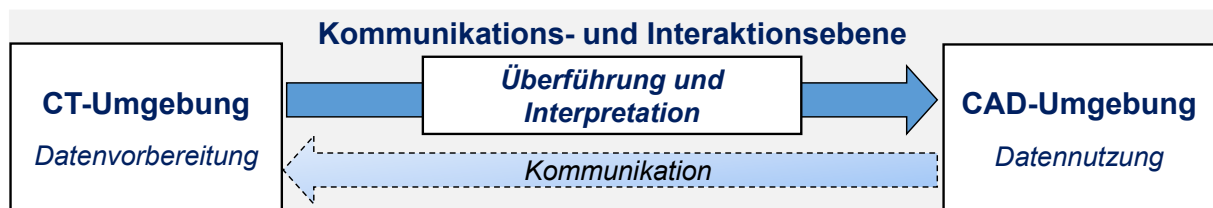


Abbildung 3-2: Interaktion computertomographischer und CAD-spezifischer Prozessebenen

Die Erläuterung der Prozesskette folgt zunächst einer sequentiellen Vorgehensweise. Dies dient dem besseren Verständnis des Gesamtprozesses. Um jedoch einen kontinuierlichen Zugriff auf alle originären Objektinformationen zu gewährleisten, ist es grundsätzlich ein rekursiver Prozess.

²⁹ TXT: Textdatei

³⁰ API: Application Program Interface

³¹ Framework ist eine Struktur, die dem Softwareentwickler Bausteine (sogenannte Klassen) zur Erstellung von individuellen Programmen zur Verfügung stellt.

Die CT-Umgebung adressiert vorrangig eine Struktur auf Basis computertomographischer Daten sowie Methoden für deren Initialisierung und Steuerung. CAD-Umgebungen hingegen definieren ein technologisches System mit einer systematischen Vorgehensweise und entsprechenden Methoden in Form von Funktionsbausteinen, die eine volumenbasierte, analytische Modellstruktur entwickeln. Mit der Überführung und Interpretation ist eine individuelle Bereitstellung und Übergabe der Objektinformationen aus der CT-Umgebung in die CAD-Umgebung gegeben, welche vorrangig über Repräsentationsformen erfolgt. Dabei entsteht eine direkte Kommunikation beider Umgebungen. Die Kommunikations- und Interaktionsebene ergänzt die Überführung und Interpretation um einen rekursiven Prozess, wodurch ein bidirektionaler Informationsfluss realisiert wird. Dieser Prozess orientiert sich am methodischen Vorgehen der Modellierung zur Erstellung analytischer Volumenmodelle. Dazu werden die in der CAD-Umgebung vorhandenen Funktionsbausteine verwendet, um Objektinformationen aus der CT-Umgebung abzufragen und sie nachfolgend gezielt für die Konstruktion anzuwenden. Diese Bereitstellung der Informationen erfolgt als Repräsentationsform oder auch als ausgewählte Konstruktionsreferenz.

Das zentrale Modellersystem der Prozesskette ist, wie in der Zielstellung formuliert das CAD-System. Abhängig davon, ob es sich um eine Neu- oder um eine Änderungskonstruktion handelt, kann der Prozess jedoch auch bilateral gesteuert werden, das heißt sowohl von der CT-Umgebung als auch der CAD-Umgebung. Beide Umgebungen können somit grundsätzlich auch unabhängig voneinander agieren.

Datenvorbereitung

In der CT-Umgebung erfolgt aufgrund der variierenden computertomographischen Datenformate zunächst die Erstellung einer einheitlichen Datenbasis. Diese dient der Initialisierung und Verwaltung der Schichtbildsequenzen. Danach werden die Daten für eine gezielte Anwendung vorbereitet. Dieser Schritt schafft eine einheitliche Ausgangslage auf vielfältige Rahmenbedingungen. Die Datenvorbereitung besteht aus vier Teilprozessen, die ineinander übergehen können (Abbildung 3-3).

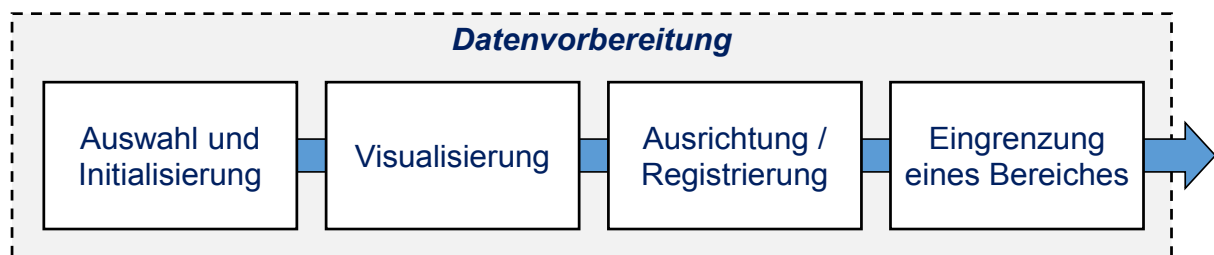


Abbildung 3-3: Bestandteile der computertomographischen Datenvorbereitung

Initial wird der ausgewählte computertomographische Datensatz in eine homogene Datenstruktur überführt, die verschiedene Datenformate vereint und notwendige bildbasierte Zusatzinformationen verwaltet. Zur Erfassung der dichte-basierten Objektinformationen erfolgt anschließend eine kombinierte Visualisierung. Dafür werden die bekannten Methoden zur zwei- und dreidimensionalen Analyse eingesetzt. Der Visualisierung geht die Möglichkeit voraus, Datensätze auf Grundlage einer Vorausrichtung in eine definierte Lage zu überführen. Sind

bereits digitale Soll-Daten (z.B. einzelne Objektstrukturen) oder CAD-Geometrieelemente vorhanden, kann mit Hilfe der Registrierung eine feste Ausrichtung erfolgen. Ausrichtung und Registrierung dienen der Erfassung verschiedener und im Prozess unbekannter Bedingungen (Abschnitt 3.1.1). Sie transformieren das mit dem Datensatz ausgewählte Objekt in eine definierte räumliche Position und Orientierung. Innerhalb der Schichtdaten können über vorhandene Soll-Elemente und spezifische Auswahlwerkzeuge wesentliche Objektinformationen eingrenzt und somit selektiert werden. Dieser Schritt ist bei Bedarf ergänzender Informationen beliebig oft wiederholbar.

Überführung und Interpretation

Nach Abschluss der Eingrenzung können anwenderspezifisch sowohl computertomographisch strukturierte Objektinformationen als auch rein initialisierte CT-Daten in die CAD-Umgebung überführt werden. Diese Transformation beinhaltet eine Übergabe der Repräsentationsformen und dafür notwendigen Kenngrößen an die CAD-Umgebung. Damit werden wesentliche Transformationseigenschaften wie etwa die räumliche Lage und Orientierung des Objekts mit vorgegebener Skalierung in die CAD-Umgebung und somit in das jeweilige CAD-System übernommen. Zudem werden anwenderspezifische, substantielle Eigenschaften zur Interpretation der jeweiligen Repräsentationsform übertragen. Die eigentliche Interpretation als Repräsentationsform geschieht in der CAD-Umgebung. Dazu sind die Voraussetzungen in CAD-Systemen wie die vorhandenen Schnittstellen und die Funktionsbausteine zur Modellierung notwendig. Das Ergebnis sind erforderliche Objektinformationen als einheitlich skalierte und adaptiv erstellte Repräsentationsform innerhalb des CAD-Systems (Abbildung 3-4).

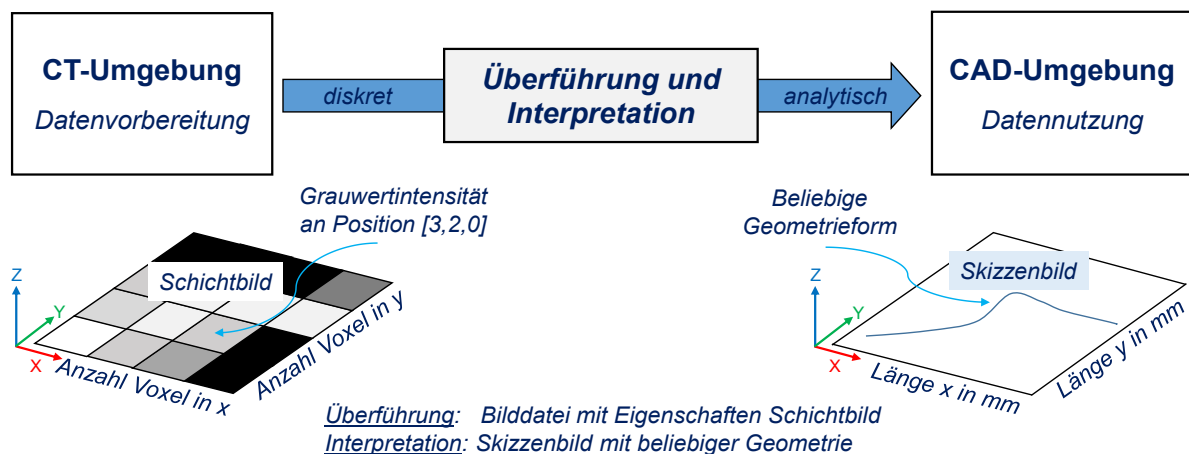


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Datenüberführung und Interpretation

Kommunikations- und Interaktionsebene

Die Kommunikations- und Interaktionsebene bildet die Wechselbeziehungen der beiden Umgebungen über einen systematischen Kreislauf ab. Dabei wird nach einer konkreten Abfrage aus der CAD-Umgebung zu einer Objektinformation in den CT-Daten eine adäquate Antwort (z.B. als Objektmerkmal oder Objektstruktur) aus der CT-Umgebung formiert (Abbildung 3-5). Diese werden mit Hilfe der Datenüberführung und Interpretation sowie mit bekannten Metho-

den der Bildverarbeitung übertragen. Prozessual liegen die Methoden in Form unterschiedlicher Funktionsbausteine vor. Sie ermöglichen eine adaptive Anpassung der jeweiligen Repräsentationsform und ihrer jeweils gewünschten Eigenschaften. Dies erfolgt über eine intuitive und teilweise automatisierte Handhabung, wobei der Konstrukteur das finale Ergebnis immer in einem begrenzten Maße regulieren kann. Dafür werden im Verlauf dieses Kapitels für jede Repräsentationsform exemplarische Lösungsmuster vorgestellt und beispielhaft veranschaulicht.

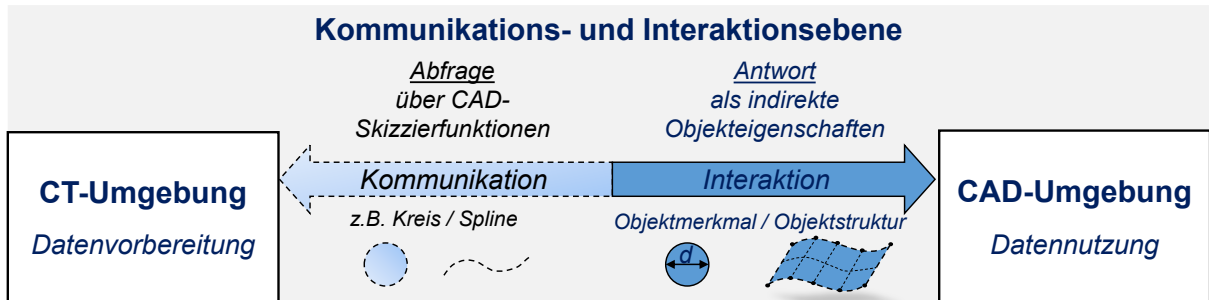


Abbildung 3-5: Prinzip der Kommunikations- und Interaktionsebene

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile der Prozesskette erläutert und mit Methoden und exemplarischen Anwendungen unterlegt.

3.3 Die Datenvorbereitung

3.3.1 Eingangsinformationen und Visualisierungsformen

Charakterisierung der zugrundeliegenden Datenbasis

Eingangsinformationen computertomographischer Daten können als einzelne Graustufenbilder oder auch als vollständige Schichtbildsequenz vorliegen. Dabei werden die nachfolgenden Konstellationen angewandt:

- Standardisierte CT-Datenformate (DICOM® / DICONDE) mit bildbezogenen Metadaten
- Einzelbild-Rasterdatenformate (RAW, PNG, JPEG, TIFF) mit zusätzlicher Angabe der Position, Orientierung und einer Skalierung (Voxelgröße) als separate Metadatei

Somit bilden unterschiedliche Datenformate für CT-Daten die Grundlage dieser Prozesskette. Um innerhalb einer Anforderung zu jedem Zeitpunkt der Prozesskette über alle Informationen verfügen zu können, empfiehlt sich die permanente Nutzung der Originaldaten.

Werden alle Eigenschaften der unterschiedlichen Datenformate betrachtet, beinhaltet somit die bildbasierte Struktur eine Schnittmenge aller Eingangsinformationen. Entscheidend hierfür sind die jeweiligen Datenformate und ihre Metadaten zur Charakterisierung und Quantifizierung der Objektinformationen. Demnach wird für die zu entwickelnde Vorgehensweise eine einheitliche Datenbasis erstellt, die alle definierten Formatbeschreibungen computertomographischer Daten integriert. Darin wird jedes Schichtbild in einer Matrix als 3D-Reihe (Array)

dargestellt, welche die Eigenschaften jedes Matrixelementes beinhaltet [50]. Diese Eigenschaften sind die Dimensionen, der Grauwert und die Raumkoordinate jedes Voxels.

Die Struktur ist an den Aufbau des DICOM[®] 3.0 Standard [42, 97] angelehnt und bietet den Vorteil einer gemeinsamen Verwaltung. Dadurch lassen sich unabhängig vom Datenformat nahezu alle bildbasierten Methoden und Verfahren auf dieser Struktur anwenden. Metadaten zur Charakterisierung der enthaltenen räumlichen Objektinformationen werden damit gleichermaßen und unabhängig von ihrer Quelle einheitlich erfasst und verwaltet. Dementsprechend werden die betreffenden TAGS (Abschnitt 2.1.2) in den Headerdaten der CT-Standard-Formate ausgelesen oder die Informationen manuell über eine separate Abfrage in der Struktur erfasst.

Abbildung 3-6 zeigt Auswahl und Initialisierung in Abhängigkeit von der Art der vorliegenden Eingangsdaten. Der Konstrukteur kann mit dem laufenden Prozess über eine individuelle Schichtbildauswahl und eine manuelle Eingabe der Metadaten interagieren.

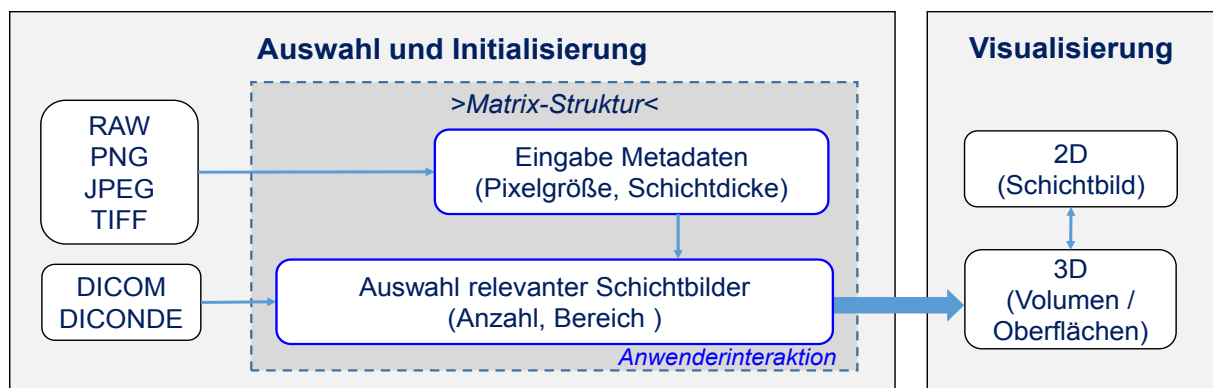


Abbildung 3-6: Auswahl und Initialisierung der CT-Daten (Nach [98])

Visualisierungsformen

Es existieren drei wesentliche Verfahren, um eine detailgenaue Objektbetrachtung und -bearbeitung computertomographischer Daten vorzunehmen. Diese sind die zweidimensionale Schichtbilddarstellung, die dreidimensionale Volumendarstellung und die grauwertspezifische Oberflächenvisualisierung (Tabelle 2-1).

Die Volumenvisualisierung basiert auf den Originaldaten und bietet vielfältige Darstellungsmöglichkeiten und ein höheres Informationsspektrum. Einerseits können alle Dichteinformationen über eine dreidimensionale Ansicht generiert werden. Andererseits werden über die Variation von Grauwerten unterschiedliche Objektbereiche spezifiziert. Oberflächenvisualisierungen sind vor allem wegen ihrer schnellen Abbildungseigenschaften sehr anwenderfreundlich und ressourcenschonend. Darüber hinaus bieten sie den Vorteil vielfältiger Bearbeitungsmöglichkeiten. Als Repräsentationsform können sie auch für weiterführende Betrachtungen in Werkzeugen der Produktentwicklung genutzt werden.

Für eine permanente Verfügbarkeit aller computertomographischen Informationen wird für die Umsetzung der vorgestellten Prozesskette allgemein eine kombinierte Visualisierung in Anlehnung an DAHLKE favorisiert [99]. Hierbei können ein Volumenmodell und ein über die Oberflächenbestimmung generiertes Polygonmodell gleichzeitig dargestellt werden. Damit werden

bedarfsgemäß unterschiedliche Darstellungsformen volumen- oder oberflächenbasierter Modelle erstellt. Dies geschieht adaptiv, sodass Anpassungen permanent in Form und Größe möglich sind [99]. Jede Visualisierungsform wird separat mittels unterschiedlicher Methoden erstellt und gerendert³². Abbildung 3-7 zeigt die kombinatorische Umsetzung von dreidimensionaler Volumen- und Oberflächenvisualisierung am Beispiel einer Schädelknochendarstellung. Ergänzend werden zweidimensionale Schichtbilder dargestellt.

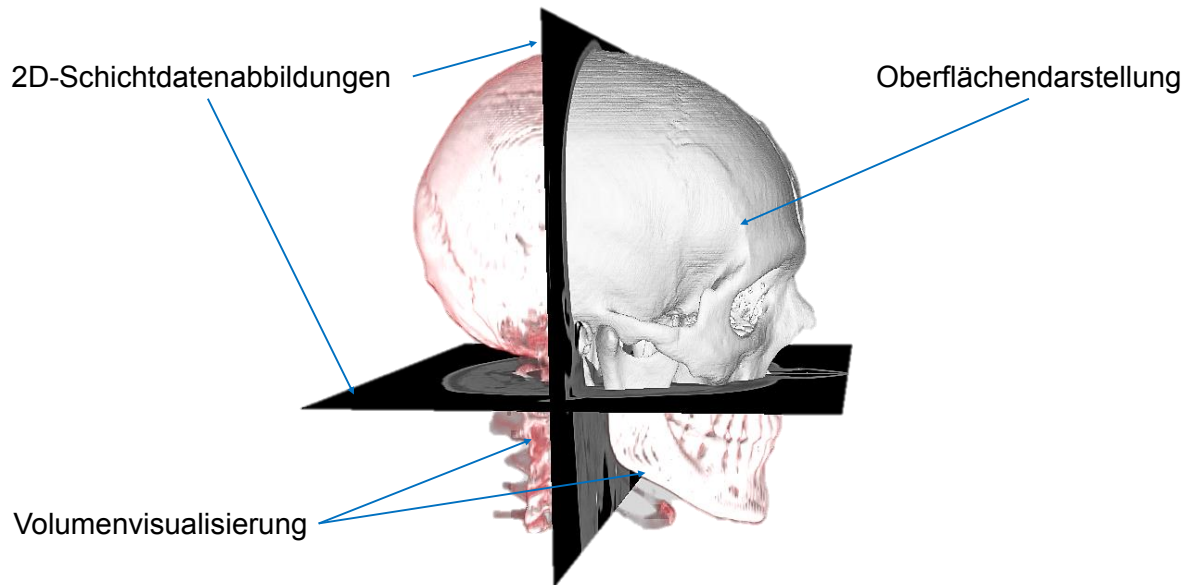


Abbildung 3-7: Kombinierte Visualisierung aller aus dem Voxelvolumen generierbaren Formen

Die Volumenvisualisierung erfolgt dabei nach dem Modell des RAYCASTING, einem Bildraumverfahren, das für jeden Bildpunkt des Voxelvolumens einen sogenannten Sichtstrahl (ray) generiert (Abbildung 3-8). Dieser durchbricht das Voxelgitter und tastet es in definierten Intervallen ab (casting). Dabei werden an den einzelnen Abtastpunkten des Voxelgitters, also am Punkt des Eintrittes, des Überganges und des Austrittes die lokalen Dichtewerte berechnet. [50]

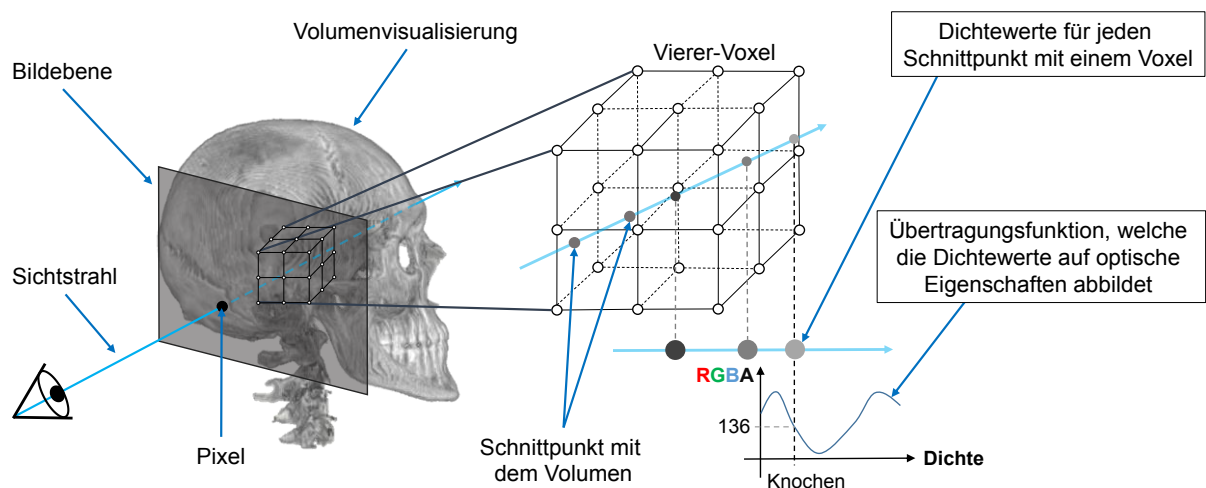


Abbildung 3-8: Funktionsprinzip des RAYCASTING (Nach [50])

³² Fachbegriff zum Generieren eines digitalen Bildes [100].

Bei der Erzeugung des Polygonmodells werden unterschiedliche Verfahren zur Oberflächenbestimmung angewandt. Dies geschieht nach vorheriger Eingrenzung eines definierten Bereiches. Je nachdem, welcher Objekt- beziehungsweise Dichtebereich dargestellt werden soll, kann eine manuelle Anpassung erfolgen. Ein Beispiel zur Erstellung eines Polygonmodells wird in Abschnitt 3.5.5 mit dem MARCHING CUBES ALGORITHMUS erläutert.

Innerhalb des kartesischen Raumes werden für verschiedene Schichtbildsequenzen die Eigenschaften der vorhandenen Matrix-Struktur genutzt. Um damit richtungsabhängige zweidimensionale Schnittdarstellungen zu erzeugen werden diese an der entsprechenden Position der Matrix-Struktur auf Grundlage lokaler Eigenschaften generiert. Ihre methodische Erstellung wird in Abschnitt 3.5.2 näher beschrieben.

Jede Form der Visualisierung kann über unterschiedliche Grafikschnittstellen wie DIRECTX^{®33} oder OPENGL realisiert werden [99–101].

3.3.2 Ausrichtung und Registrierung

Koordinatensysteme und Transformationsketten

Um aus den Schichtbildsequenzen repräsentative Ergebnisse abzuleiten und eine konstante Interaktion zu gewährleisten ist eine feste Orientierung der Objektrepräsentationen in der CT- und CAD-Umgebung erforderlich. Diese sollte über den gesamten Bearbeitungsprozess einheitlich sein. Typischerweise liegt das Objekt nach der Erfassung im Koordinatensystem des Aufnahmeapparates, im sogenannten Globalen Koordinatensystem (K_G). Hierbei müssen die räumliche Objektorientierung, d.h. das Objektkoordinatensystem (K_O) und die Lage des globalen Koordinatensystems nicht eindeutig miteinander korrespondieren (Abbildung 3-9).

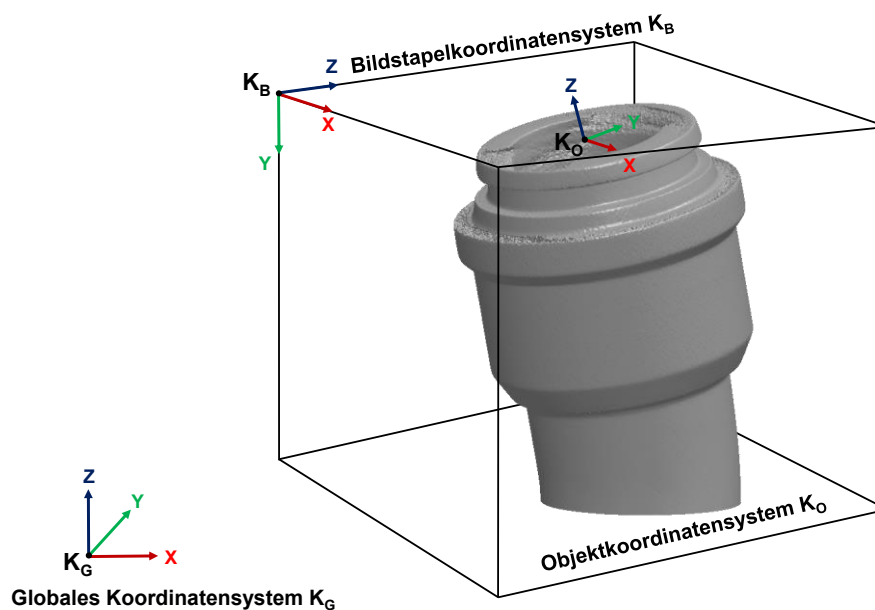


Abbildung 3-9: Bezeichnung und Zusammenhänge der Koordinatensysteme (Nach [18])

³³ DIRECTX[®] - Sammlung von Softwarebibliotheken zur Darstellung komplexer 2D- und 3D-Grafiken [100].

Die Schichtbilder hingegen befinden sich in einem eigenen Koordinatensystem, dem Bildstapelkoordinatensystem (K_B) und werden in Ihrer Lage und Orientierung durch die erste Schicht der Schichtbildsequenz repräsentiert [18]. Dieses System ist zunächst bindend für die Position und Ausrichtung des erfassten Objektes. Um jedoch eine einheitliche Betrachtung zu erhalten, müssen die Koordinatensysteme in eine gemeinsame Basis transformiert werden.

Für eine Ausrichtung verschiedener Koordinatensysteme stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Richtungsgebend für die Auswahl sind vorrangig die primären Transformationseigenschaften und die Zahl der Transformationsparameter [32]. Dabei müssen auch die Rahmenbedingungen der Erfassung berücksichtigt werden (Abschnitt 3.1.1). Wie darin festgelegt, erfolgt die Digitalisierung nicht unter dynamischen Bedingungen. Ebenso werden bei den erfassten Objekten eine feste materielle Konsistenz und räumlich konstante Dimensionen, insbesondere eine feste Skalierung vorausgesetzt. Deshalb werden alle Koordinatensysteme ausschließlich dreidimensional durch Rotation und Translation miteinander ausgerichtet. Sechs Freiheitsgrade, drei Verschiebungen und drei Drehungen sind so in den kartesischen Koordinatenrichtungen gebunden [32]. Dieser Vorgang wird als starre Transformation (rigid transformation) bezeichnet und kann in mehreren Stufen erfolgen [20].

Initiale Ausrichtung

Der erste visuelle Objekteindruck erfolgt über die Lage des Bildstapelkoordinatensystems (K_B). Durch Rotation und Translation der Koordinaten wird die Objektlage inkrementell variiert. Dabei erfolgt eine grobe initiale Ausrichtung des Objektes innerhalb der vorliegenden Schichtbildsequenz. Aus methodischer Sicht wird mit Hilfe der Bewegungsinformation ein neues Bildstapel-Koordinatensystem bestimmt und so ein neuer gerichteter Bildstapel generiert. Dieser verfügt über die identischen Bildparameter des Originaldatensatzes, jedoch erweitert um die entsprechenden initialen Informationen. Die Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 verdeutlichen diesen Prozess an einem Beispiel.

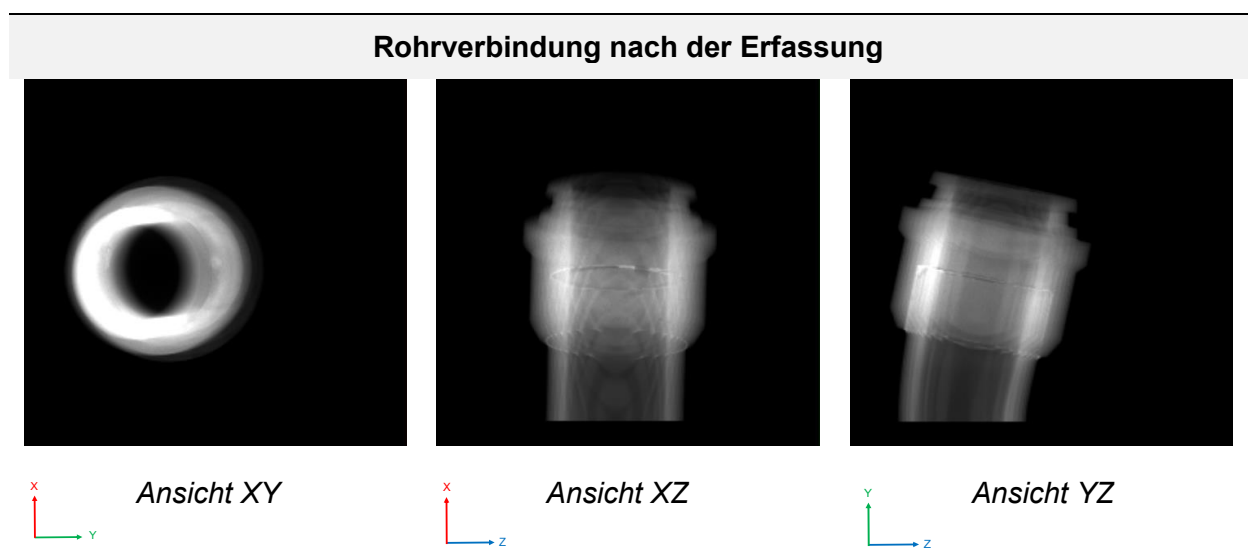


Abbildung 3-10: Initiale Ausrichtung am Beispiel eines Rohres - Zustand nach Erfassung

In drei Ansichten einer gelöteten Rohrverbindung zeigt sich, dass diese beliebig im Raum erfasst wurde und so in den Daten abgebildet wird. Für eine eindeutige Lage des Objektes erfolgt

bei initialer Ausrichtung eine Drehung des Datensatzes um die Hauptachsen in den kartesischen Koordinatenebenen XZ und YZ, so dass die Zylinderachse senkrecht in der vorliegenden Bildstapelansicht liegt (Abbildung 3-11).

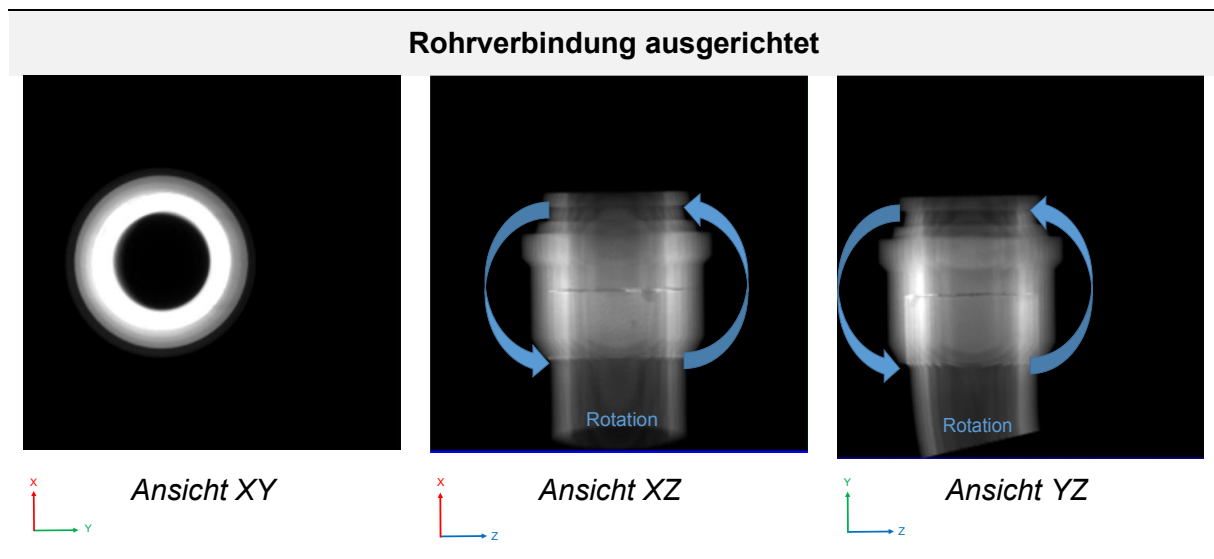


Abbildung 3-11: Initiale Ausrichtung am Beispiel eines Rohres - Ausgerichteter Zustand [102]

Der ausgerichtete Zustand zeigt die Lage der Rohrverbindung im Bildstapelkoordinatensystem. Dafür wurden die entsprechenden Winkelinformationen zur Ausrichtung des Objektes an das Bildstapelkoordinatensystem transformiert. Die Position des Objektes hat sich dabei nicht verändert. Um das Objekt beispielsweise mittig innerhalb des Volumenbildes zu transformieren, kann in gleicher Weise eine weitere Translation erfolgen.

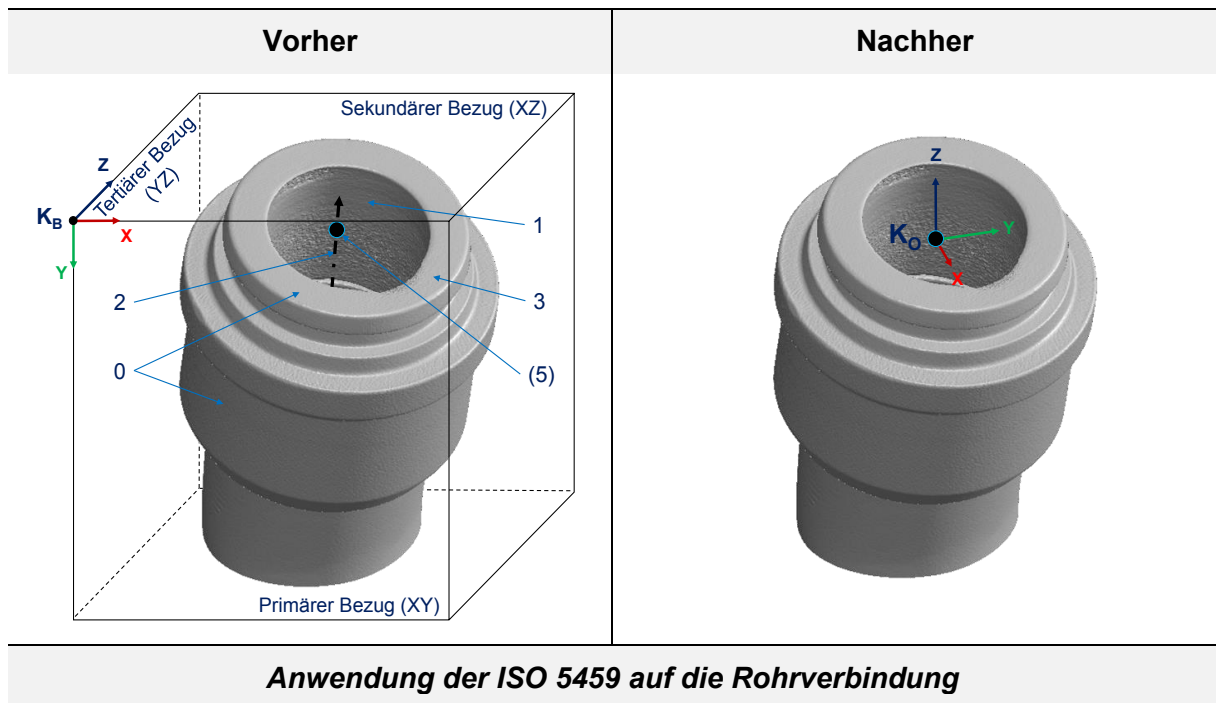
Die initiale Ausrichtung bietet somit eine erste eindeutige Betrachtung der vorliegenden Objektkonstellation. Liegen jedoch mehrere Objekte im erfassten Volumen vor, erreicht diese Form der Ausrichtung ihre Grenzen. Aus diesem Grund sollte eine definierte Ausrichtung mit einem festen Koordinatenbezug erfolgen. Sind bereits virtuelle Soll-Objekte vorhanden, ist zudem eine Registrierung erforderlich.

Definierte Ausrichtung

Die Grundlage der definierten Ausrichtung bildet das Referenzpunktsystem (RPS), welches nach ISO 5459 bei geometrischer Tolerierung angewandt wird und entsprechende Bezugssysteme festlegt [103]. Diese werden verwendet, um am Objekt ein festes Koordinatensystem (K_0) zu definieren. Dabei werden eine Menge von Situations- oder Grundelementen³⁴ (z.B. Punkt, Gerade, Ebene) gebildet, die sich aus einem oder mehreren Bezügen in einer bestimmten Reihenfolge ergeben [103]. Dieser Prozess ermöglicht eine eindeutige und reproduzierbare Positionierung von Objekten. Unterschieden wird bei diesen Elementen zwischen einem primären, sekundären und tertiären Bezug (Abbildung 3-12) [103]. Die Anwendung kann sich neben geometrischen Eigenschaften auch an objektunabhängigen externen Referenzen, wie etwa Passmarken oder Kugeln orientieren [62].

³⁴ Situations- oder Grundelemente sind Geometrielemente, die mit Primitiven gleichzusetzen sind.

Abbildung 3-12 zeigt eine definierte Ausrichtung nach dem Referenzpunktsystem der ISO 5459 an der gelöteten Rohrverbindung. Wie eingangs dargelegt, ist zunächst das Bildstapelkoordinatensystem (K_B) bindend für die Position und Ausrichtung des erfassten Objektes (Abbildung 3-12, Vorher). Das Ziel ist die Positionierung eines definierten Ursprungs im Objektkoordinatensystem (K_O), das im vorliegenden Fall zentral an der oberen Fläche des Rohres lokalisiert werden soll (Abbildung 3-12, Nachher). Zur finalen Selektion der einzelnen Bezüge werden abhängig von der geometrischen Gestalt des auszurichtenden Objektes unterschiedliche Verfahren genutzt. Die Rohrverbindung kann über eine Vielzahl an Regelgeometrien charakterisiert werden. Somit werden aus realen Oberflächen assoziierte Geometrien extrahiert und als Referenz verwendet. Wenn es aufgrund der geometrischen Eigenschaften einzelner Elemente nicht möglich ist alle sechs Bewegungsgrade im kartesischen Raum zu binden, werden alternative Kriterien über Nebenbedingungen (z.B. Abhängigkeiten) klassifiziert. Dies erfolgt mit Hilfe vorhandener sowie kombinativ mit anderen Elementen.



- 0... Reale Geometrieelemente - Zylinder der Außenfläche / Ebene der Stirnfläche
- 1... Assoziierter Innenzylinder
- 2... *Primärer Bezug* - Achse des inneren Zylinders
- 3... *Sekundärer Bezug* - Assoziierte Ebene auf der Oberseite / Stirnfläche
- 4... Rechtwinkligkeit zwischen (2) und (3) als Nebenbedingung der Richtung
- 5... *Tertiärer Bezug* - basierend auf den Situationselementen assoziierter Geometrien: Schnittpunkt zwischen Achse (2) und Ebene (3)

Abbildung 3-12: Beispielhafte Anwendung des RPS-Bezugssystems (Nach [103])

Registrierung

Die Registrierung wird verwendet, um Daten verschiedener Kategorien ineinander zu transformieren. Dabei können diverse Koordinatensysteme auf eine gemeinsame Basis ausgerichtet

und Dateninhalte (z.B. Landmarken, Geometrien) fusioniert dargestellt werden. In der medizinisch-radiologischen Diagnostik dient die Registrierung vor allem der vergleichenden Analyse computertomographischer Aufnahmen ein und desselben Patienten zu unterschiedlichen Zeitpunkten [32]. Analog dazu können bei industriell-technischen Aufnahmen in gleicher Weise einzelne Objektbereiche zu einem vollständigen dreidimensionalen Modell registriert werden [104]. Aktuell existiert bereits eine große Zahl medizinisch und industriell etablierter Registrierungsverfahren. Für eine geeignete Auswahl, die sich im Wesentlichen an der individuellen Fragestellung orientiert, ergeben sich grundsätzlich die in Tabelle 3-3 genannten Kriterien, vervollständigt mit den für diesen Prozess vorliegenden Anforderungen (Abschnitt 3.1.2) [32].

Tabelle 3-3: Kriterien bei Registrierungsverfahren mit Anforderungen dieser Prozesskette

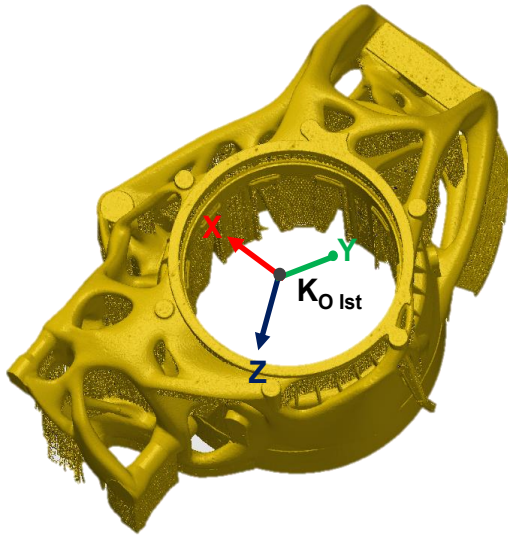
Kriterien	Vorliegende Anforderungen
Modalitäten	Computertomographische Daten
Dimensionen	2D-(CT-Ist) und 3D-(CAD-Soll) 3D-(CT-Ist) und 3D-(CAD-Soll)
Transformationsklassen	Starre Objekte
Bild- und Objektinformationen	Objektbereiche mit korrespondierenden Eigenschaften

Resultierend aus den getroffenen Konstellationen werden nach HANDELS landmarkenbasierte sowie oberflächen- und kurvenbasierte Verfahren für die Registrierung in dieser Prozesskette betrachtet [32].

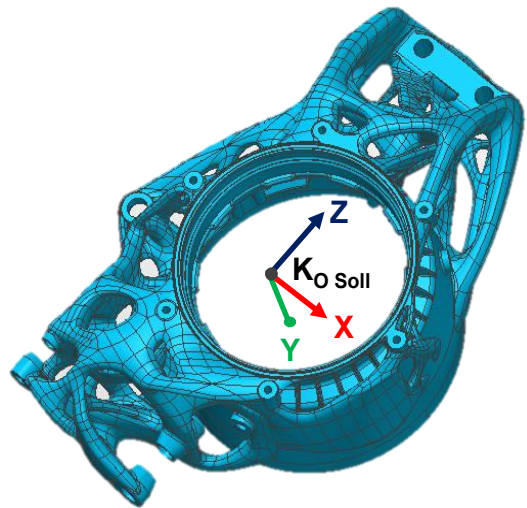
Für eine erfolgreiche Anwendung werden dazu in den registrierten Datensätzen korrespondierende Strukturen anhand ausgewählter Punkte, Linien oder selektierter Objektbereiche markiert [32]. Handelt es sich um Objekte mit vielen Regelgeometrien, werden mathematisch eindeutige Verfahren wie etwa die 3-2-1-Methode über eine Ebene, eine Linie und einen Punkt zur Registrierung eingesetzt. Bei der Registrierung von Objekten mit überwiegend freigeformten Anteilen bieten sich vorzugsweise stochastische Verfahren, sogenannte Best-Fit-Verfahren, wie etwa das ITERATIVE CLOSEST POINT (ICP-)Verfahren an [105].

In Abbildung 3-13 ist ein additiv hergestellter Radträger abgebildet, einerseits im Ist-Zustand (3D-CT-Ist) nach Fertigung und anschließender Digitalisierung, andererseits als konstruiertes Soll-Modell (3D-CAD-Soll). Für Untersuchungen der Fertigungsgenauigkeit müssen Ist- und Soll-Modelle gleichermaßen registriert werden. Dafür werden die Schichtbildsequenzen mit Hilfe der kombinierten Visualisierung vorab in eine Oberflächenrepräsentation überführt. Durch die geometrische Komplexität und variable Beschaffenheit der Modelle können nicht alle Freiheitsgrade über geometrisch eindeutige Registrierungsverfahren miteinander transformiert werden. Aus diesem Grund wird für eine eindeutige Positionierung der ICP-Algorithmus angewandt. Dieses Verfahren schafft punktuelle oder strukturelle Übereinstimmungen korrespondierender Objektbereiche in beiden Modellarten (Objektbereich: 1 bis 8) und nähert diese über die Minimierung ihrer quadratischen Abstände an [106]. Die Präzision in der Berechnung hängt dabei im Wesentlichen von der Anzahl der Referenzpunkte in den kartesischen Raum ab.

1

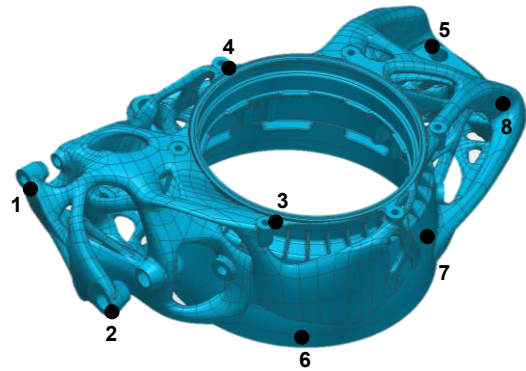
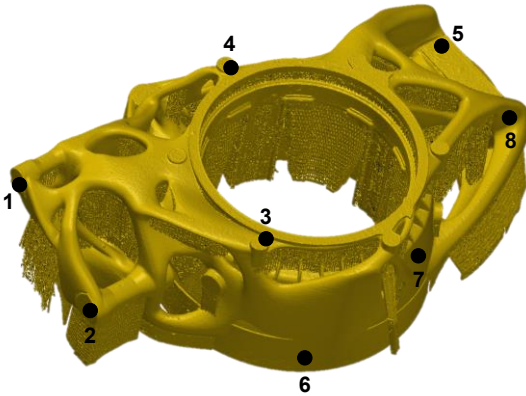


CT-Ist-Modell



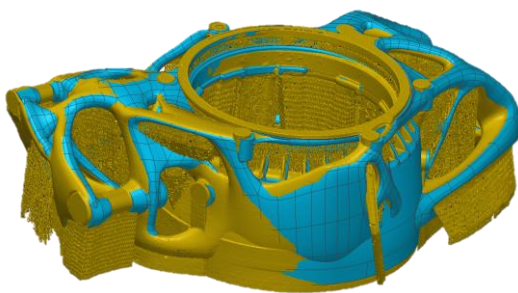
CAD-Soll-Modell

2

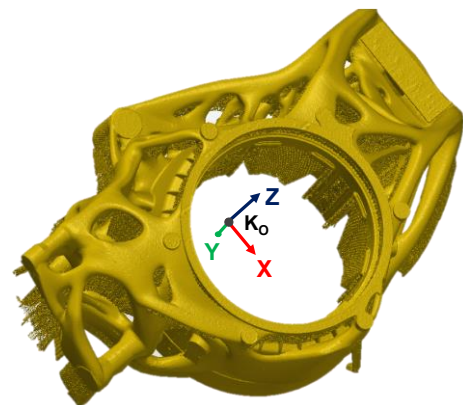


Topographische Definition korrespondierender Punkte im kartesischen Soll-Ist-System

3



Kongruenz-Projektion vor Registrierung



Registriertes Ist-Modell

Abbildung 3-13: Registrierung mittels ICP-Algorithmus am Beispiel eines Radträgers

3.3.3 Eingrenzen des Betrachtungsbereiches

Zur Übergabe der selektiv notwendigen Objektinformationen ist die Definition und Eingrenzung eines interessierenden Bereiches erforderlich. In Abhängigkeit von der Art der Anforderung

wird dabei zwischen mehreren Verfahren unterschieden:

- Schichtbild-assoziert - Begrenzung über die Auswahl
- Voxel-assoziert - Eingrenzung über bild- und volumenbasierte Eigenschaften
- Geometrie-assoziert - Definieren objektbeschreibender Merkmale

Schichtbild-assozierte Eingrenzung

Eine erste bildbasierte Eingrenzung kann bereits bei Auswahl der Schichtbilder erfolgen (Abbildung 3-14). Hierfür wird über eine zweidimensionale Voransicht und über die Schichtauswahl eine entsprechende Selektion vorgenommen. Grundsätzlich können dazu alle Schichtbilddaten oder nur bestimmte Schichtbildsequenzen ausgewählt werden. Zur Sicherung einer eindeutigen Objektskalierung sollte die getroffene Auswahl über eine homogene Struktur verfügen. Hierbei kommen beispielsweise zusammenhängende Bereiche einer Schichtbildfolge oder auch eine systematisch definierte Abfolge (z.B. jedes zweite oder jedes fünfte) in Frage.

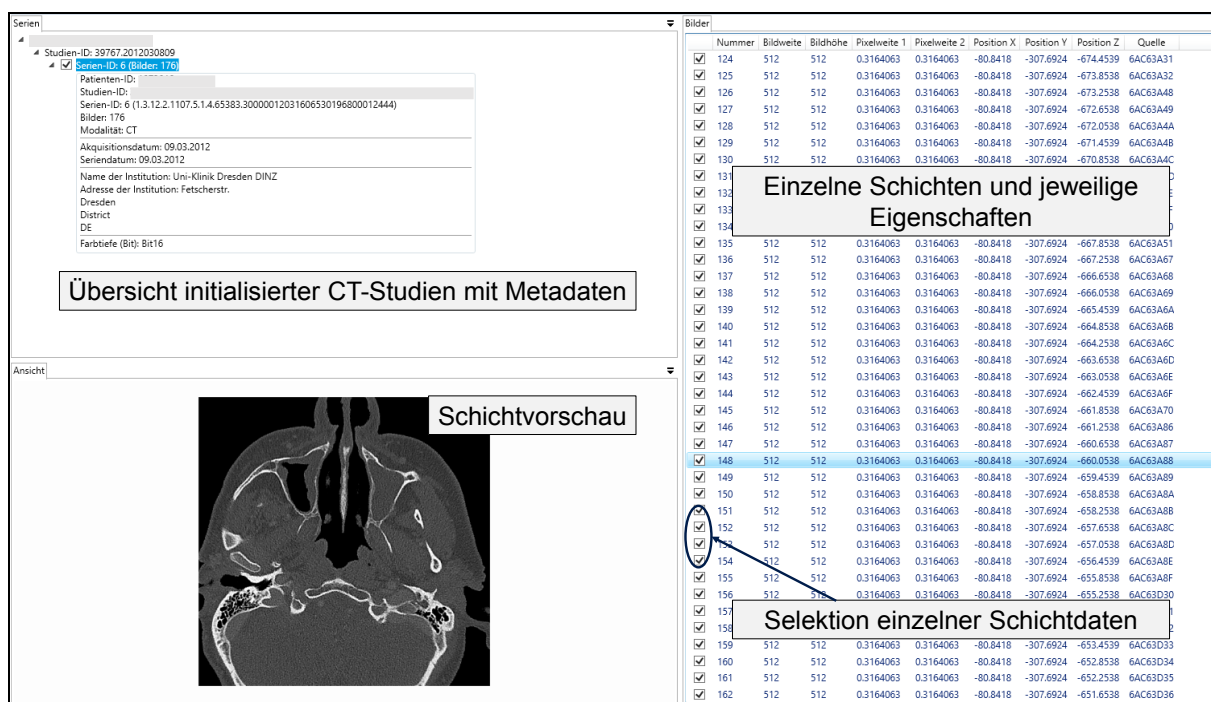


Abbildung 3-14: Eingrenzung der Schichtbildsequenz durch definierte Vorauswahl

Voxel-assozierte Eingrenzung

Eine Voxel-assozierte Eingrenzung erfolgt über die Reduktion des Aufnahmevolumens im Sinne der Bounding Box (Abschnitt 2.1.6). Diese Eingrenzung kann sowohl zwei- als auch dreidimensional realisiert werden. Die Ergebnisse bleiben jeweils identisch. Geometrische Grundlage der Eingrenzung im Bildstapelkoordinatensystem (K_B) sind die kartesischen Ebenen (XY, XZ, YZ). Da bei dieser Variante ausschließlich äußere Objektmerkmale der Orientierung dienen, ist die Flexibilität der Eingrenzung methodisch limitiert. Zur Kompensation kann mit geometrischen oder individuellen Eingrenzungen als Region of Interest (Abschnitt 2.1.6)

eine anwenderspezifische ebene oder räumliche Separierung erfolgen. Beide Verfahren bewirken eine Reduktion der Datenbasis auf den inhaltlich relevanten Bereich. Die Anzahl der Schichten eines Datensatzes (BB) beziehungsweise auch der in einer Schicht vorhandene Voxelanzahl werden auf den eingegrenzten Bereich (ROI) limitiert. Alle Voxel-Eigenschaften und ursprünglich erfassten Informationen bleiben damit innerhalb der Eingrenzung unverändert.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Voxel-assozierte Eingrenzung mit der Bounding Box für den zweidimensionalen und den dreidimensionalen Fall. In Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 sind drei Schädel-Ansichten eines medizinischen Computertomogramms dargestellt. Die farblich gekennzeichneten Vertikalen und Horizontalen stehen für die kartesischen Achsen der jeweiligen Ansicht. Diese dienen der Eingrenzung des Aufnahmevolumens innerhalb des Bereiches, der die gewünschten Objektinformationen enthält.

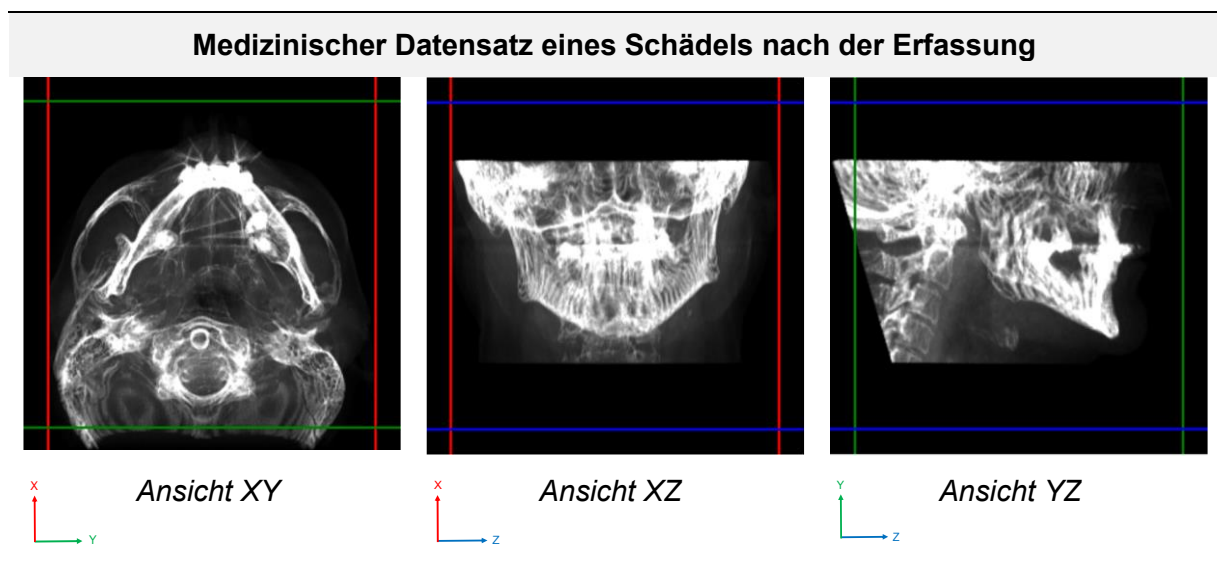


Abbildung 3-15: Objektkonstellation einer Schichtbildsequenz nach der Erfassung

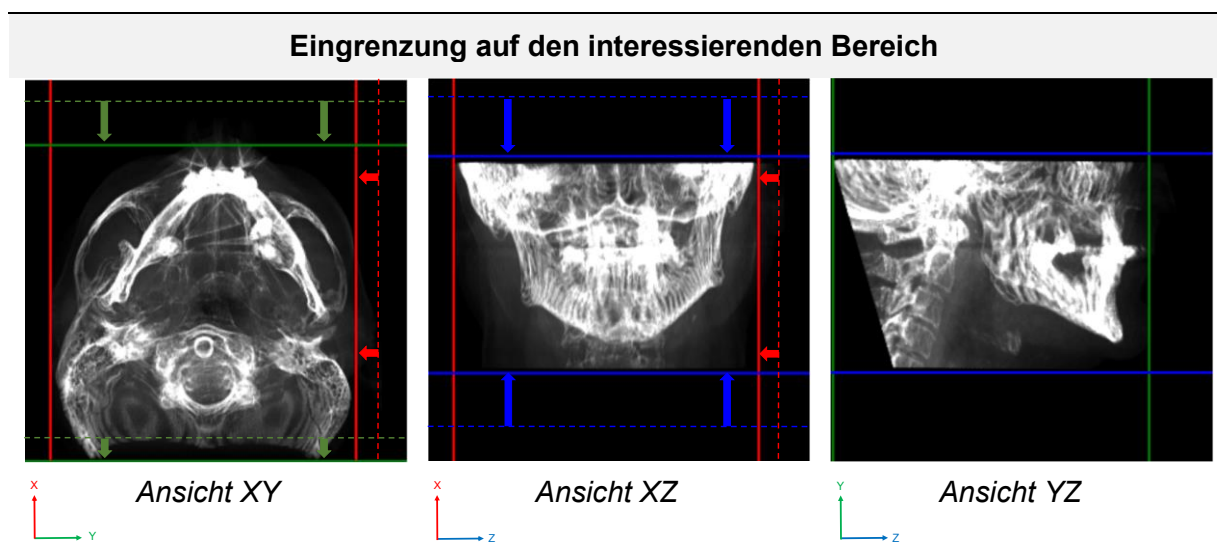


Abbildung 3-16: Volumenreduktion durch Eingrenzung auf wesentliche Objektinformationen

Abbildung 3-17 zeigt die Eingrenzung mit Hilfe einer Bounding Box im räumlichen Bereich.

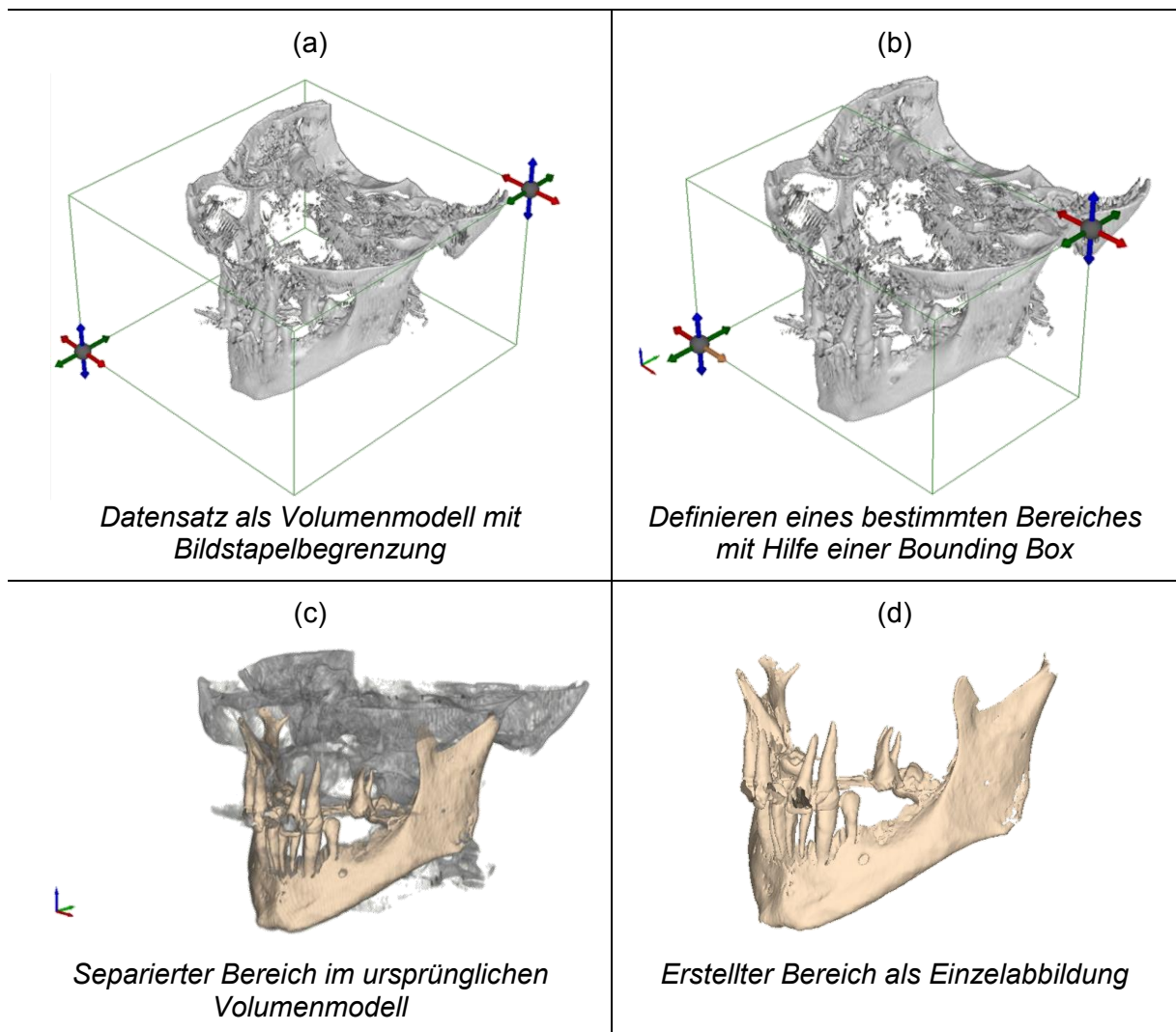


Abbildung 3-17: Eingrenzung einer dreidimensionalen Struktur mit Hilfe einer Bounding Box

Geometrie-assoziierte Eingrenzung

Geometrische Eingrenzungen lassen sich auch durch sogenannte Landmarken vornehmen. Landmarken werden primär auf markante Punkte zur Kennzeichnung von Objekteigenschaften begrenzt. Jedoch können über die Kombination beziehungsweise die Variation von Punkten weitere geometrische Formen gebildet werden. Die Auswahl dieser Referenzelemente richtet sich dabei nach den anwenderspezifischen Objektmerkmalen. Hierbei werden vorrangig einfache Grundgeometrien und Freiformgeometrien genutzt. Die eigentliche Parametrisierung und somit die exakte Lage und Orientierung jedes Elementes erfolgen über die Eigenschaften des erfassten Objektes innerhalb der Datenbasis. Dabei können auch diverse metrische Eigenschaften wie Längen- oder Abstandsmaße dargestellt werden.

Tabelle 3-4 zeigt eine Übersicht von Referenzelementen zur Selektion von Objektbereichen. Die Definition der jeweiligen Elemente erfolgt in Anlehnung an deren Eigenschaften. Bei ausgewählten Referenzelementen ist auch die Definition über unterschiedliche Kombinationen

(z.B. Ebene) und Variationen (z.B. Spline) möglich. Die Auswahl erfolgt grundlegend anwenderseitig im Hinblick auf die vorliegende Problemstellung.

Tabelle 3-4: Übersicht und Eigenschaften objektbestimmender Referenzen

Referenzelemente	Eigenschaften
Punkt	Position (x, y, z), Orientierung (Normale)
Linie	Anfangs- und Endpunkt
Ebene	Punkte und Linien
Kreis	Mittelpunkt, Durchmesser oder Radius
Spline	Kontrollpunkte, Kurvenmorphologie

Funktionsseitig erfolgt die Erstellung der Referenzen, wie schon bei der Registrierung, über eine kombinierte Modellrepräsentation. Dadurch wird ein besseres Feedback bei der Selektierung erreicht. Über eine alleinige Volumenvisualisierung werden grundsätzlich mehr Informationen dargestellt, jedoch ist deren lokale Interpretation vor allem bei medizinischen Objekten oder komplexen Objektbereichen (z.B. Hinterschnidungen) schwieriger.

Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Schichtbild- und Voxel-assoziierten Verfahren bilden die Referenzelemente nur begrenzte Informationsbereiche ab. Damit sind nicht mehr alle primären Eigenschaften der CT-Daten enthalten. Außerdem ergibt sich eine Reduktion der Datenmenge.

Die folgenden beiden Abbildungen veranschaulichen diesen Prozess an dem bereits gezeigten medizinischen Beispiel. In Abbildung 3-18 wird die Erstellung einer Referenzebene (E_1) an einem Unterkiefer verdeutlicht. Dazu werden mindestens drei Referenzpunkte (EP_{1-3}) um den Schnittbereich definiert. Anschließend erfolgt die Erstellung einer Ebene, welche die definierten Punkte begrenzt. Im vorliegenden Fall hat die Ebene E_1 bereichsspezifisch eine Kreisform. In den Abbildung 3-18 a und b wird dazu eine kombinierte Visualisierung aus Oberflächen- und Volumenvisualisierung zur Selektion des Bereiches genutzt.

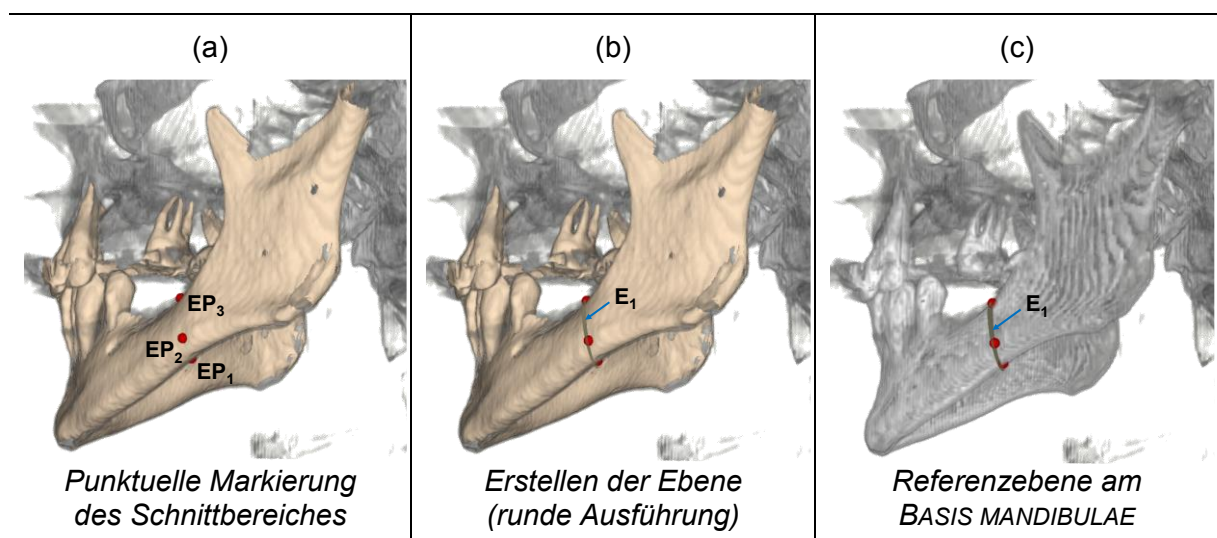


Abbildung 3-18: Festlegen eines Schnittbereiches über eine Referenzebene

In Abbildung 3-19 erfolgt die Erstellung einer beliebig geformten Referenz zur Kennzeichnung des Unterkieferverlaufes. Dazu werden analog dem Vorgehen in Abbildung 3-18 eine bestimmte Anzahl an Stützpunkten (SP_1 bis SP_{19}) um den Unterkieferverlauf (Spline-Kurve K_1) definiert. Diese werden anschließend über eine Spline-Interpolation, z.B. durch eine B-SPLINE miteinander verbunden.

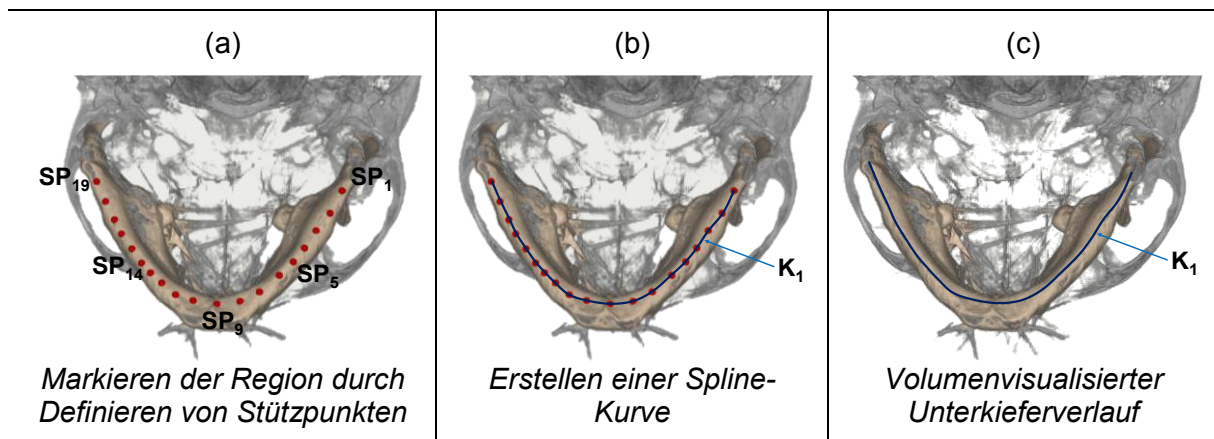


Abbildung 3-19: Markieren des Unterkieferbereiches über einen Spline

Die Eingrenzung des Auswahlbereiches kann anwenderspezifisch iterativ erfolgen. Essenzielle Grundlage der Datenbasis ist dabei die primäre Auswahl der Schichtbildsequenz. Ist die getroffene Auswahl unzureichend, muss dieser Vorgang bis zur Initialisierung der Matrix-Struktur wiederholt werden.

Sowohl die nach der initialen Auswahl als auch nach der Datenvorbereitung entstandene Datenbasis können in die CAD-Umgebung übertragen werden.

3.4 Das Prinzip der Datenüberführung und Interpretation

Systemische Voraussetzungen

Um übertragene Objekteigenschaften gezielt nutzen zu können, müssen die Voraussetzungen eines CAD-Systems (Abschnitt 3.1.4) mit den Eigenschaften der CT-Datenstruktur (Abschnitt 3.1.3) in Verbindung gebracht werden.

Wenn ausschließlich die Struktur computertomographischer Daten betrachtet wird, gibt es in CAD-Systemen keine passende Schnittstelle. Grauwertintensitäten können über systemspezifische Eigenschaften (z.B. Modellierkerne) nicht abgebildet werden. Weder ein einzelnes Schichtbild noch eine Schichtbildsequenz können in Ihrer jeweils originären Form übertragen werden. Andererseits bilden CAD-Systeme Modellstrukturen ab, die über Objekteigenschaften, wie etwa Skizzierelemente und Konstruktionsreferenzen vorrangig als parametrisch analytische Geometrielemente erstellt werden. Für eine konstante Übertragung müssen demzufolge die entsprechenden Schnittstellen des CAD-Systems respektive der CAD-Umgebung mit aus computertomographischen Daten generierten Objekteigenschaften und somit ihren Repräsentationsformen korrelieren. Um auf dieser Grundlage eine direkte und interaktive Nut-

zung zu gewährleisten, bedarf es weiterer Bedingungen, die zwischen den Umgebungen gegeben sein müssen:

- Uniforme Transformationsparameter
- Einheitliche Skalierung
- Eindeutige Interpretationsformen

Der Fluss einer homogenen Prozesskette ist grundsätzlich an eine Interaktion zwischen CT- und CAD-Umgebung und an uniforme Transformationseigenschaften gebunden. Diese beinhalten eine eindeutige Position und Orientierung im kartesischen Koordinatensystem.

Für die realen Dimensionen ist eine einheitlich definierte Skalierung eine grundlegende Voraussetzung. Diese wird vor allem über die Anzahl und Größe einzelner Voxel und damit über die determinierte Datenstruktur bestimmt. Die Skalierung für Aufgabenstellungen der vorliegenden Prozesskette basieren auf dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Neben diesen universellen Faktoren, sind die Eigenschaften der jeweiligen Repräsentationsformen und deren eindeutige Interpretation in der CAD-Umgebung ein weiterer wichtiger Bestandteil.

Die Interpretationsform beschreibt den jeweiligen Zustand, wie eine Repräsentationsform in der CAD-Umgebung gedeutet und als Modellform zusammengesetzt wird. Dabei gibt es in der Regel mehrere Varianten, wobei präferierte Lösungen in den etablierten Systemen vorzufinden sind. Die Anzahl der Interpretationsvarianten hängt von den individuellen Möglichkeiten jedes CAD-Systems ab.

Methodik zur Anwendung von Schichtbildsequenzen in der CAD-Umgebung

CAD-Systeme und ihre Schnittstellen sind die entscheidenden Bestandteile der Prozesskette bei der Übertragung avisierte computertomographische Daten. Aufgrund proprietär lizenzierter Systemspezifikationen, häufiger Wechsel der Versionen und notwendiger Updates sind aktuell neutrale Schnittstellen die konstanteste Übertragungsform, auch und vor allem im Hinblick auf ihre Systemunabhängigkeit. Neutrale Schnittstellen können entweder manuell über die Importfunktion oder automatisiert über die Programmierschnittstelle des CAD-Systems integriert werden.

Um eine Schichtbildsequenz und ihre determinierten räumlichen Eigenschaften in der CAD-Umgebung abbilden zu können, wird die Speicherungsform der einzelnen Schichtbilder verwendet. Schichtbilder können als einzelne Bilddatei gespeichert und mit entsprechenden Metainformationen in Volumendaten transferiert werden. CAD-Systeme verfügen entsprechend ihrer Schnittstellen grundsätzlich über die Eigenschaft, Bilddaten verarbeiten zu können. Zudem erfolgt deren Systematik zum Erstellen von Volumenmodellen ausgehend von einer primär zweidimensionalen Skizzenform.

Zum Transfer eines Schichtbildes aus seiner originären Sequenz wird somit neben den Transformationsparametern auch eine einzelne Bilddatei des jeweiligen Schichtbildes an die CAD-Umgebung überführt. Es erfolgt eine Abbildung des Schichtbildes als Rastergrafik. Diese wird durch die ebenen Eigenschaften des betreffenden Schichtbildes repräsentiert.

Gleichzeitig wird ein Bezug auf das in der CT-Umgebung liegende Schichtbild erstellt. Dieses bildet mit Hilfe der uniformen Transformationseigenschaften eine komplementäre Referenz der jeweiligen Schicht und folglich des gesamten Volumens in der CT-Umgebung. Somit wird ein kontinuierlicher Zugriff auf alle internen Informationen der Datenbasis aus der CAD-Umgebung ermöglicht.

Dieser methodische Ansatz bildet das Grundgerüst der Prozesskette und wird neben der visuellen Darstellung in Abbildung 3-20 nachfolgend beschrieben.

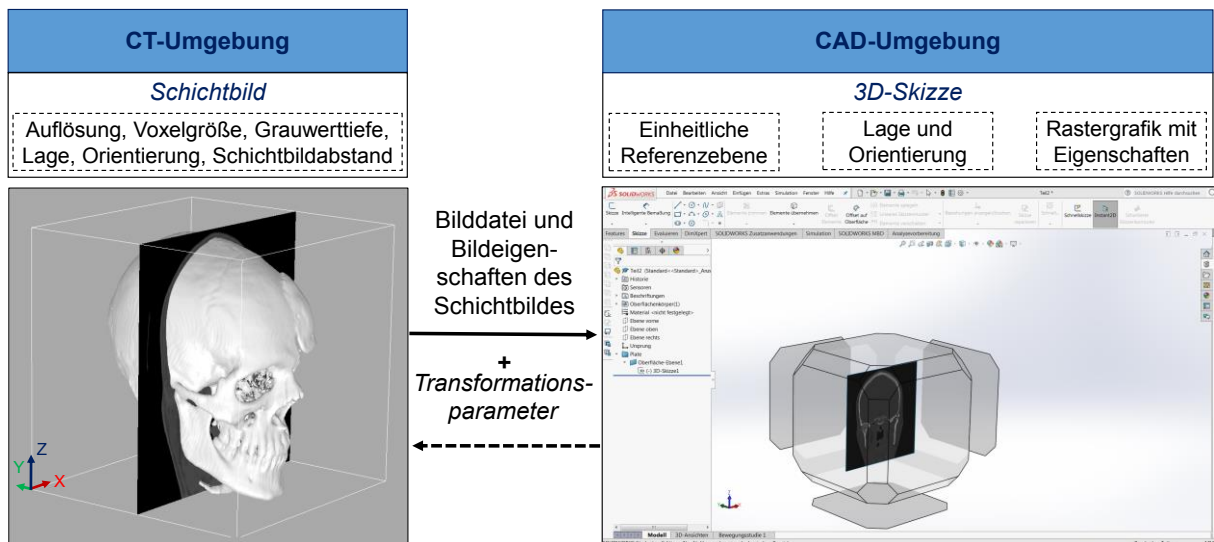


Abbildung 3-20: Übertragung eines Schichtbildes aus der CT-Umgebung in die CAD-Umgebung am Beispiel von SOLIDWORKS® 2020

Dabei wird ein beliebiges Schichtbild aus der CT-Umgebung in die CAD-Umgebung überführt. Ausgehend vom Voxelvolumen wird dieser Prozess über folgende Schritte realisiert.

CT-Umgebung:

- 1) Erfassung des Schichtbildes und seiner morphologischen Eigenschaften aus dem Voxelvolumen - Anzahl und Größe der Voxel mit Position und Orientierung innerhalb des Bildstapelkoordinatensystems
- 2) Übertragung der Transformationseigenschaften als rastergraphisches Komplement des Schichtbildes
- 3) Anwenden der neutralen Schnittstelle der CAD-Umgebung zum Import von Bilddateien

CAD-Umgebung:

- 4) Skizzenerstellung
- 5) Auswahl einer Basisreferenz im kartesischen Koordinatensystem
- 6) Definition einer Referenzebene (Skizzierebene) mit den Transformationsparametern auf der Basisreferenz
- 7) Interpretation der Bilddatei in Form eines Skizzenbildes auf der Referenzebene mit den übertragenen Bildeigenschaften

Über diese Schrittfolgen können beliebig viele Schichtbilder übertragen werden.

Um die räumlichen Eigenschaften aus den CT-Daten innerhalb der CAD-Umgebung abzubilden, werden verschiedene Strategien angewandt. Der Abstand (Schichtdicke Z_A) der Schichtbilder (Z_1 und Z_2) wird dabei über die Distanz der aufeinanderfolgenden Referenzebenen (RE_1 und RE_2) determiniert. Abbildung 3-21 verdeutlicht das exemplarische Prinzip. Dabei dient die Oberflächenvisualisierung lediglich zur dreidimensionalen Orientierung. Für die innerhalb einer Schichtbildsequenz (Z_{i+j}) vorliegenden Grauwertverteilungen und damit die mittelbaren und unmittelbaren Objekteigenschaften wird die Verbindung zur CT-Umgebung und somit zur Datenbasis genutzt.

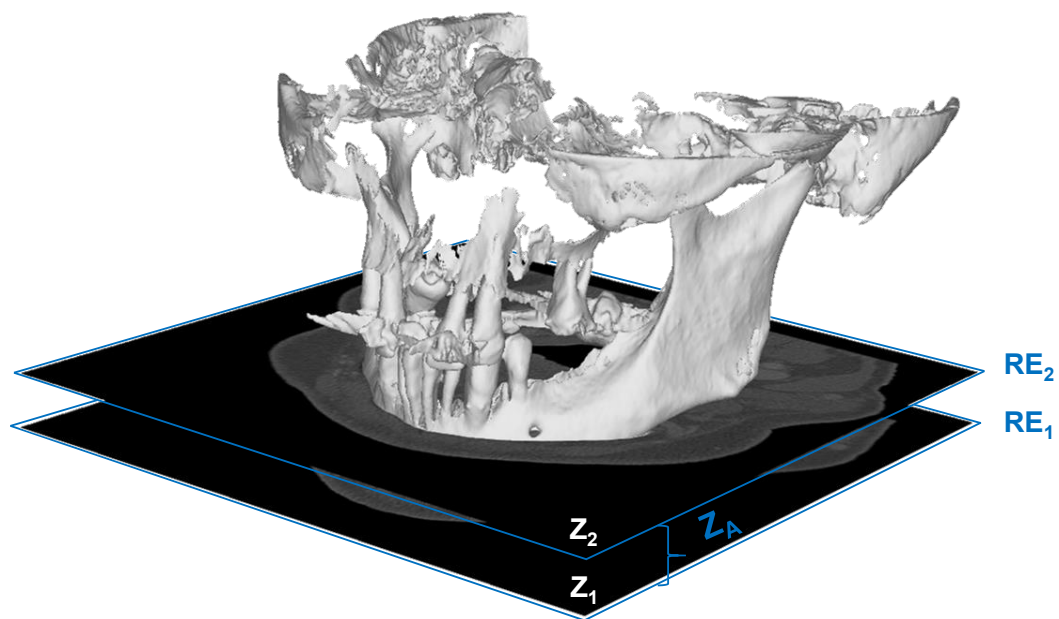


Abbildung 3-21: Abbildung räumlicher Eigenschaften von Schichtbildsequenzen in CAD-Umgebungen

Überführung und Interpretation von Repräsentationsformen

Alle vorhandenen Repräsentationsformen lassen sich mit den aktuell etablierten CAD-Schnittstellen übertragen. Die Prozesskette ermöglicht einen permanenten Zugriff auf die Originaldaten. Grundsätzlich müssen dazu die bereits genannten Bedingungen essenziell erfüllt sein. Ebenso ist ein konstanter Bezug auf die CT-Umgebung und die vorliegende Datenbasis erforderlich.

Für die jeweilige Repräsentationsform werden bestimmte Eigenschaften überführt, aus denen sich die Interpretationsform in der CAD-Umgebung zusammensetzt.

Die Überführungsform definiert die geometrischen Eigenschaften und Parameter, die zur Bildung einer Repräsentationsform erforderlich sind. Deren Generierung erfolgt individuell, entweder direkt oder indirekt aus den Eigenschaften des Voxelvolumens. Sie wird zusätzlich zu den Transformationsparametern in die CAD-Umgebung übertragen und bildet initial die Basis der Interpretationsform.

Die zusammenfassende Abbildung einer Repräsentation hängt vor allem von der Interpretationsform des jeweiligen CAD-Systems ab. Aktuell verfügbare CAD-Systeme weisen diesbezüglich nur geringe Unterschiede auf. Insbesondere sind alle wesentlichen geometrischen Grundformen in ihrer Anwendung nahezu gleich. Tabelle 3-5 zeigt am Beispiel von SOLIDWORKS eine Übersicht zur Übertragung von Repräsentationsformen in die CAD-Umgebung.

Tabelle 3-5: Übertragung und Interpretation von Repräsentationsformen an die CAD-Umgebung am Beispiel von SOLIDWORKS® (Auszug)

CT Umgebung <i>Datenbasis als potenzielle Repräsentationsform</i>	Übertragung		CAD Umgebung <i>Interpretationsform</i>	
	<i>Transformationsparameter und Skalierung</i>	<i>Überführungsform</i>		
Einzelnes Schichtbild	<i>Position und Orientierung</i> im kartesischen Koordinatensystem	Einzelne Bilddatei mit Eigenschaften	Bilddatei als Skizzenbild	
Analytische / Diskrete freie Randkontur eines Objektes		Stützpunkte und Kurvenmorphologie	DE-BOOR ³⁵ -Punkte mit Verbindung über einen B-SPLINE ³⁶	
		Einzelne Punkte, Polylinie	Polygonzug zur Abbildung des Kantenverlaufs	
Diskretes Oberflächenmodell		<i>Anzahl und Größe der Voxel</i>	Polygonmodell mit Dreiecks-Normalen und Koordinaten	Grafikkörper ³⁷
Landmarken signifikanter Objektmerkmale		Einzelne Punkte	Punktuelle Modellreferenzen	

Objektbezogene Referenzen (Abschnitt 3.3.3) werden ebenso wie Repräsentationsformen in die CAD-Umgebung übertragen. Ihre Interpretationsformen sollten in der Regel systemübergreifend identisch sein. Dabei können die einzelnen Elemente Teil einer Skizze für ein dreidimensionales Modell sein, das heißt eine Modellreferenz bilden. Darüber hinaus finden sie Anwendung als komplementäre Konstruktionsreferenz. Somit werden die Interpretationsformen bei der Übertragung vorgegeben und interaktiv über den Modellierprozess festgelegt.

Tabelle 3-6 zeigt eine Übersicht der in Tabelle 3-4 vorgestellten Referenzelemente. Hierbei werden die Elemente Punkt, Linie und Ebene als Konstruktionsreferenz festgelegt. Kreis und Spline bilden eine Modellreferenz.

³⁵ DE-BOOR-Punkte sind Stützpunkte einer B-SPLINE, welche nach Carl De-Boor benannt wurden.

³⁶ B-SPLINES werden als Beschreibungsform von einer Vielzahl an CAD-Systemen unterstützt [14, 25, 73].

³⁷ Besondere Darstellungsform eines diskreten Oberflächenmodells, wobei jede Dreiecksfacette ohne analytischen Bezug dargestellt wird. Alternativ unterscheidet SOLIDWORKS® noch BREP-Netzkörper, wobei die Facetten zu geometrischen Flächen verknüpft sind und über eine analytische Gleichung bestimmt werden können [107].

Tabelle 3-6: Objektbezogene Referenzen und deren Interpretation im CAD-System

CT Umgebung <i>Objekteigenschaften als Referenzen</i>	Übertragung		CAD Umgebung <i>Interpretationsform</i>
	<i>Transformations- parameter und Skalierung</i>	<i>Überführungsform</i>	
Punkt	<i>Position und Orientierung</i> im kartesischen Koordinatensystem	Einzelner Punkt	Skizzenpunkt
Linie		Anfangs- und Endpunkt	Rotationsachse
Ebene		Punkte / Linie(n)	Referenzebene
Kreis		Mittelpunkt und Radius	Kreisgeometrie
Spline		<i>Anzahl und Größe der Voxel</i>	Stützpunkte und Kurvenmorphologie

Mit der Kontinuität der Prozesskette werden weitere Repräsentationsformen und Referenzen iterativ übertragen. Somit können Konstruktionen mit CT-Informationen in der CAD-Umgebung interaktiv modelliert werden.

Um gezielte Repräsentationsformen zu erstellen und methodisch alle originären computertomographischen Informationen abzuleiten, wird in Abschnitt 3.5 ein äquivalentes Kommunikations- und Interaktionskonzept vorgestellt.

3.5 Die Kommunikations- und Interaktionsebene

3.5.1 Methodenbeschreibung

Computertomographische Daten und die darin enthaltenen Objektinformationen werden in ihrer Diversität in identifizierten Repräsentationsformen verwendet. Der Konstrukteur hat in der heutigen digitalisierten Welt konkrete individuelle Fragestellungen zur Anwendung der Computertomographie. So sind hybride Produktentwicklungen, industrielle Bauteilprüfungen oder freigeformte medizinische Implantate gegenwärtig häufig vorliegende Problemstellungen, für deren technische Umsetzung es jedoch einen methodisch sehr variablen und kaskadenartigen Prozess verlangt [10, 108, 109].

Ein Kommunikations- und Interaktionskonzept ergänzt die Datenüberführung und ist grundlegende Bedingung zur Schaffung der benötigten Repräsentationsform. Somit ist es ein funktionell essenzieller Bestandteil der Prozesskette. Diese Konzept besteht kommunikativ aus einem im Folgenden so genannten Abfrageschritt, der mittels Modellierungswerkzeugen aus der CAD-Umgebung erfolgt (Abbildung 3-22). Darüber hinaus soll es eine Antwort auf individuell benötigte Anforderungen im Rahmen der technischen Umsetzung geben. Diese Anforderun-

gen betreffen die individuell angefragte Repräsentationsform mit ihren erforderlichen technischen Eigenschaften.

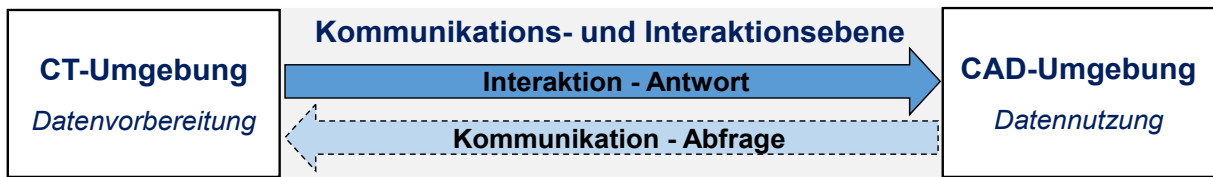


Abbildung 3-22: Abfrage und Antwort innerhalb der Kommunikations- und Interaktionsebene

Allgemeine Grundabfragen

Basierend auf der computertomographischen Struktur können drei allgemeine Grundabfragen unterschieden werden. Sie werden über die geometrischen Grundformen eines CAD-Systems definiert, aus denen sich direkte klassische Eigenschaften der Datenbasis abbilden lassen (Tabelle 3-1): Punkt, Linie und Ebene.

Ein Punkt in einem Schichtbild kennzeichnet die geometrisch kleinste und mengenmäßig unteilbare Eigenschaft der sequenziellen Computertomographie. Physikalisch ist er ein Intensitäts- oder Dichtewert. Eine Linie summiert eine zusammenhängende eindimensionale Abfolge von Intensitätswerten zwischen zwei Punkten. Mit Hilfe einer Ebene können Merkmale zweidimensionaler Volumensequenzen, die sich über die Summe aller Punkte und Linien definieren lokalisiert werden. Somit sind eine komplette Schichtbildsequenz und ihr entsprechendes Volumen über die genannten Grundabfragen mit nahezu allen direkten Eigenschaften erreichbar (Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7: Allgemeine geometrische Grundabfragen computertomographischer Eigenschaften

Dimension	Abfrage	Antwort
0D	Punkt	Intensitätswert an der Position
1D	Linie	Endliche Intensitätsreihe
2D	Ebene	Intensitätsareal
3D	Volumen	Intensitätsvolumen

Trotz ihrer hohen interaktiven Variabilität haben CAD-Systeme systematische Grenzen. Mit ihnen lassen sich methodisch bedingt keine Intensitäts- oder Dichtewerte abbilden. Um projizierte Antworten abgebildeter Objekte in CAD-Systeme zu transferieren, stehen erweiterte Grundabfragen und abgeleitete Abfragen zur Verfügung.

Erweiterte Grundabfragen

Erweiterte Abfrageformen entstehen prinzipiell aus den bereits genannten allgemeinen Grundabfragen und deren Kombinationen. Ihre Anwendung oder Abfrage kann sich zweidimensional über eine Schichtbildsequenz oder dreidimensional über einen definierten Bereich der Schichtbilder erstrecken. Dabei bestimmt die Größe des Voxelvolumens die räumlichen Grenzen der

Abfrage. Antworten der erweiterten Grundabfragen werden somit über die bekannten direkten Eigenschaften des Voxelvolumens generiert. Ihre Abbildung in der CAD-Umgebung erfolgt in Form einzelner Schichtbilder oder als umschriebene Schichtbildsequenz (Tabelle 3-8) nach dem Prinzip der Datenüberführung und Interpretation (Abschnitt 3.4).

Tabelle 3-8: Erweiterte Grundabfragen

Dimension	Abfragen	Antworten
2D	Geometrisch planare Primitive (z.B. Kreise, n-Ecke)	Planarer Schichtbildbereich der definierten Abfrageform, mit bildbasierten lokalen Eigenschaften
3D	Geometrisch räumliche Formen (z.B. Kugel, Quader)	Schichtbildsequenz - Eigenschaften mit Definition über räumliche geometrische Abfragen

Beispiele für methodische Umsetzungen einer erweiterten Abfrageform sind die Region of Interest und die Bounding Box. Strukturell beliebige Abfrageformen sind somit durch individuelle Freiformgeometrien im Sinne einer ROI möglich. Als CAD-seitige Äquivalente schichtbild- und voxel-assoziiertes Eingrenzungen liegen damit grundsätzlich alle originären Informationen der Datenbasis vor. Jedoch sind diese, wie in Abschnitt 3.3.3 bereits verdeutlicht, auf den vorab definierten Abfragebereich limitiert.

Abgeleitete Abfrageformen

In der entwickelten Prozesskette sollen nur Informationen übertragen werden, die für eine entsprechend vorgegebene Aufgabenstellung notwendig sind. Es ist in vielen Fällen nicht ausreichend, Schichtbildausschnitte oder Sequenzbereiche zu transferieren. Das Ziel des Anwenders ist vielmehr der Erhalt der gewünschten Objektinformation respektive der benötigten Repräsentationsform. Hierzu werden sogenannte abgeleitete Abfragen verwendet. Sie basieren methodisch auf dem Prinzip erweiterter Grundabfragen, die jedoch um zusätzliche Informationen und additive Methoden erweitert werden. So erfolgt die Generierung der indirekten Eigenschaften als Übertragungsform und somit die Interpretation und Visualisierung als Repräsentationsform in der CAD-Umgebung.

Tabelle 3-9 zeigt Auswahlkriterien abgeleiteter Abfrageformen. Die abgebildeten Methoden verdeutlichen dabei jeweils aktuell etablierte Verfahren, die zur Transformation indirekter Eigenschaften verwendet werden. Die Zahl hierbei angewandter Verfahren ist grundsätzlich nicht beschränkt und orientiert sich methodisch flexibel, jedoch alleinig an der jeweils angestrebten Qualität der Repräsentationsform. Abgeleitete Antworten auf der Interaktionsebene beinhalten grundlegend die CAD-assoziierte Überführungsform. Das Hauptziel bleibt jedoch immer eine detaillierte segmentale Übertragung in das CAD-System. Die dargestellten Formen zur Erstellung von Objektstrukturen sind in der Tabelle 3-9 jeweils mit etablierten technischen Anwendungen hinterlegt. Für die Generierung einer Objektstruktur über eine Konturerkennung stehen aktuell diverse Verfahren und nicht nur der CANNY-Operator zur Verfügung. Zudem sind exemplarisch für die Geometriebestimmung (Objektstruktur) und Modellerstellung (Diskretes Oberflächenmodell) der RANSAC- und der MARCHING CUBES Algorithmus genannt.

Tabelle 3-9: Abgeleitete Abfrageformen zur Bildung einer Übertragungsform (exemplarisch)

Art	Abfrage	Methode	Beschreibung	Antwort
Konturerkennung	Festlegung von Punkten zur Bereichsbegrenzung	CANNY-Operator	Kantenbestimmung	Polygonzug als diskrete Kontur
Geometriebestimmung	Kreisförmige Definition einer ROI auf einem Schichtbild	RANSAC ³⁸ -Algorithmus	Objekterkennung und Klassifizierung der Geometrie	Kreis als analytische Geometrie
Modellerstellung	Räumliche Eingrenzung eines Randbereiches	MARCHING CUBES ALGORITHMUS	Schwellwertverfahren	Diskretes Oberflächenmodell

3.5.2 Ergänzende Schnittansichten

Eine Schichtbildsequenz enthält Informationen über die räumliche Struktur der untersuchten Objekte. So werden neben den originären Informationen alle drei Dimensionen des Voxelvolumen abgebildet. Schichtbildinhalte können damit innerhalb des kartesischen Koordinatensystems beliebig visualisiert werden. In Computertomographien der radiologischen Diagnostik werden transversale, frontale und sagittale Visualisierungen zur dreidimensionalen Interpretation medizinischer Fragestellungen eingesetzt [32]. Dabei nimmt die lateinische Terminologie Bezug auf einheitliche anatomische Lage- und Richtungsbezeichnungen (Abbildung 3-23) [48]. In der industriellen Computertomographie erfolgt die Bezeichnung in analoger Form anhand der Koordinatenebenen des kartesischen Koordinatensystems (Abbildung 3-23).

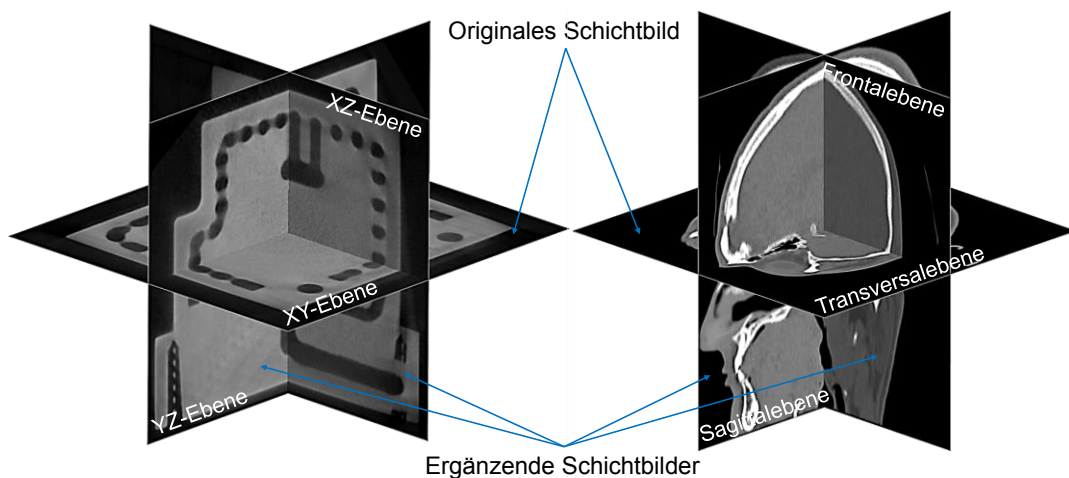


Abbildung 3-23: Schichtbildbezeichnung - Technische (links), Medizinische (rechts)

³⁸ RANSAC: RANDOM SAMPLE CONSENSUS - Algorithmus

Abbildung 3-24 zeigt die Erzeugung einer ergänzenden Schichtbildansicht an einem industriellen Beispiel.

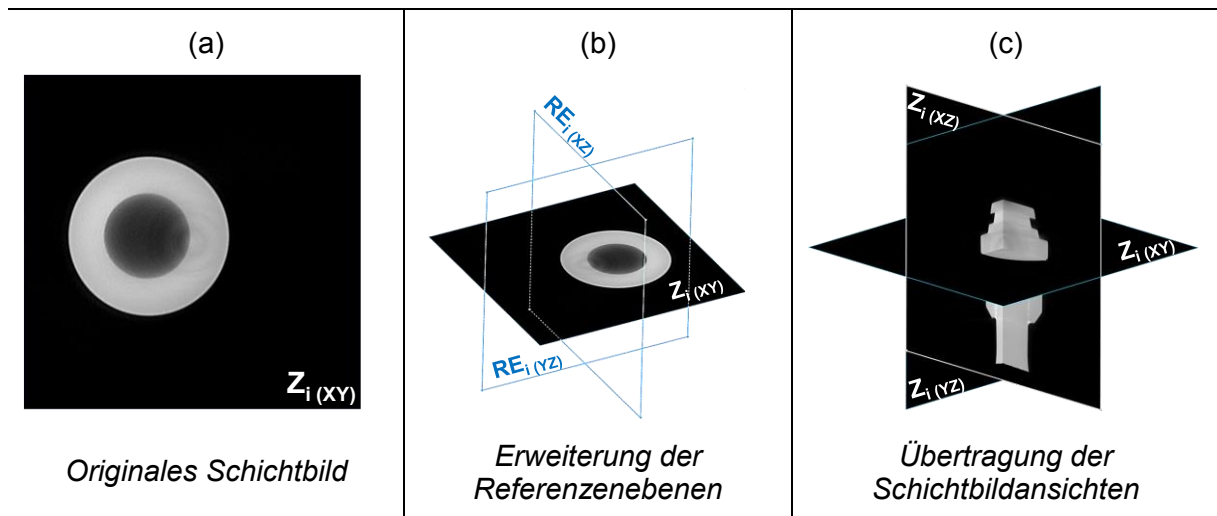


Abbildung 3-24: Erstellung ergänzender Schichtbildansichten aus der CAD-Umgebung

Ein in die CAD-Umgebung übertragenes originäres Schichtbild ist die Basis zur Erstellung einer Änderungskonstruktion (Abbildung 3-24 a). Es repräsentiert eine Sequenz aus der kartesischen XY-Ebene. Mit der dargestellten Systematik der Datenüberführung aus Abschnitt 3.4 zeigt sich die methodische Verbindung zur gesamten Volumensequenz. Die originale Schichtbildperspektive ($Z_i(x,y)$) limitiert entscheidend die Interpretation des vorliegenden Objektes. Deshalb werden zusätzliche Ansichten ($Z_i(x,z)$, $Z_i(y,z)$) benötigt, um eine eindeutige Ausgangssituation zu erhalten. Zur notwendigen dreidimensionalen Visualisierung erfolgt die Hinzunahme zweier orthogonal zueinander stehender Referenzebenen ($RE_i(x,z)$, $RE_i(y,z)$) (Abbildung 3-24 b). Diese werden auf dem vorliegenden Schichtbild mittels CAD-Skizzierfunktionen modelliert. Position und Orientierung sowie die Dimensionen beider Ebenen ($RE_i(x,z)$, $RE_i(y,z)$) werden als erweiterte Abfrage an das Voxelvolumen der CT-Umgebung übertragen. Zur Erzeugung korrespondierender Schichtbilder ($Z_i(x,z)$, $Z_i(y,z)$) werden die Eigenschaften der an dieser Stelle im Voxelvolumen respektive in der Datenbasis bestehenden Funktionswerte ermittelt. Daraus wird nachfolgend jeweils das angefragte Schichtbild generiert (Abbildung 3-24 c). Im vorliegenden Fall wird zur Generierung und Visualisierung das lineare Interpolationsverfahren verwendet [32].

Ergänzende Schichtbildansichten kommen sowohl bei Neu- als auch bei Änderungskonstruktionen in Form einer initialen Repräsentation zur Anwendung. Die Erstellung einer Änderungskonstruktion erfordert die vorherige Registrierung (Abschnitt 3.3.2) mit der computertomographischen Modellgeometrie.

Eine methodische Variante ergänzender Schichtbildansichten sind beliebig im Voxelvolumen liegende Schnittbilder. Obwohl sie mit Hilfe planarer Abfrageformen generiert werden, korrelieren sie nicht mit den Achsen des kartesischen Koordinatensystems und sind innerhalb des Voxelvolumens frei wählbar. Die Modellierung der Geometrien geschieht ebenso durch die bekannten CAD-Skizzierfunktionen und ist individuell flexibel. Sie orientiert sich allein an den

gewünschten Objekteigenschaften. Nach einer erweiterten Abfrage mit den Eigenschaften der Geometrieform erfolgt so die Synthese eines beliebigen Schnittbildes. Methodisch wird dazu eine trilineare Interpolation der Grauwertintensitäten an der avisierten Position im Voxelvolumen durchgeführt. Die so interpolierten Bildfunktionswerte werden nachfolgend aus den benachbarten Grauwertpunkten der Datenbasis ermittelt [32]. In Abbildung 3-25 ist das schematische Prinzip an einem Voxel dargestellt:

- Interpolation entlang der X-Achse zur Lokalisierung von e_{12} , e_{34} , e_{56} und e_{78}
- Interpolation entlang der Y-Achse zur Lokalisierung von e_0 und e_1
- Interpolation entlang der Z-Achse zur Lokalisierung des Punktes V_e und zur Grauwertbestimmung

Die trilinearen Interpolationen sind beliebig, jedoch nicht sequenziell in X-Y-Z-Richtung durchführbar. Jedem Punkt der beliebigen Schnittebene entspricht ein interpolierter Grauwert.

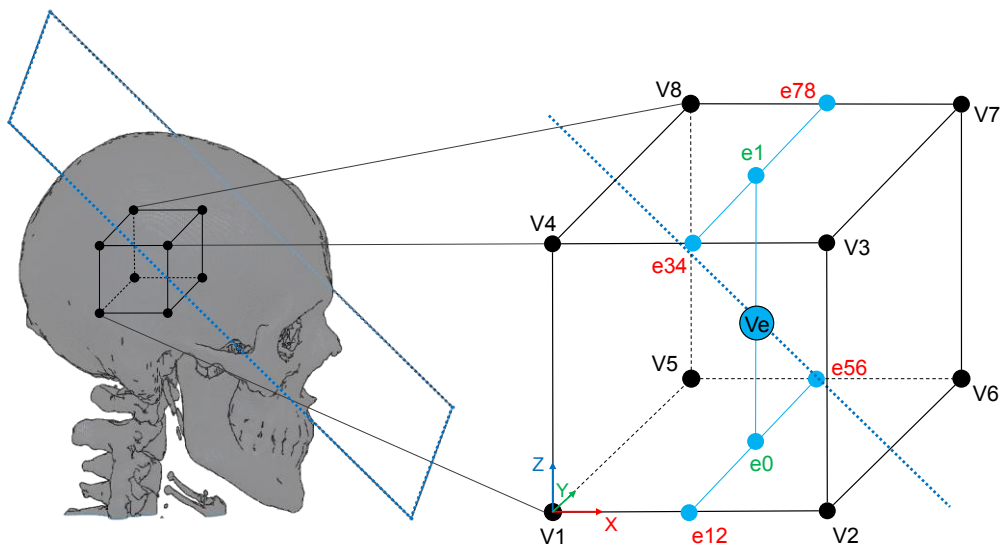


Abbildung 3-25: Erzeugen eines beliebigen Schnittbildes über trilineare Interpolationen (Bezeichnung nach [110])

Abbildung 3-26 verdeutlicht die methodische Erzeugung an einem medizinischen Beispiel. Anatomische Strukturen folgen keiner klaren Geometrie. In der diagnostischen Radiologie bestimmt die individuelle klinische Fragestellung die Position der Schnittebene. So sind auch zur Beurteilung der strukturellen Konsistenz einer Schädel-Kalotte alle Schnittebenen frei wählbar. Da CAD-assoziierte Modelle nur homogene Objektbereiche abbilden, ist die Erstellung einer beliebigen Schnittansicht erforderlich. Dazu wird mit CAD-Skizzierfunktionen eine planare erweiterte Abfrage als Referenzebene (RE_i) des umschriebenen Bereiches an die CT-Umgebung gestellt. Analog zu den ergänzenden Schichtansichten werden somit die geometrischen Eigenschaften der Referenzebene übertragen und dadurch im Voxelvolumen angefragt. Über die trilineare Interpolation werden die Bildfunktionswerte innerhalb der Datenbasis ermittelt und als Schichtsequenz (Z_i) an die CAD-Umgebung übertragen. Die Antwort zeigen die Darstellungen in Abbildung 3-26 b und c.

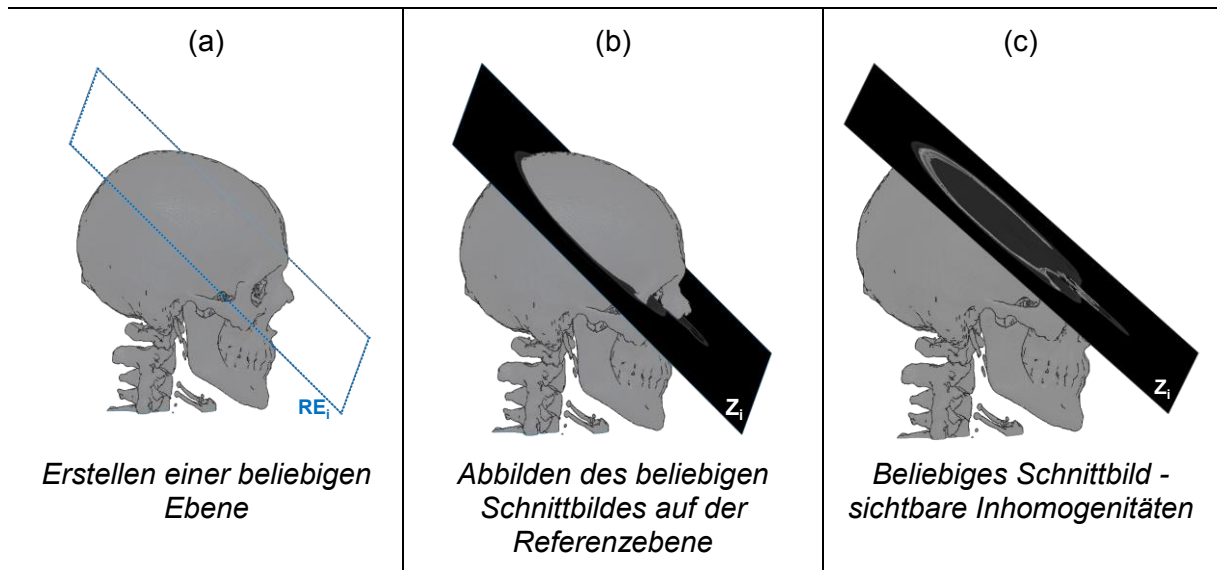


Abbildung 3-26: Erstellung eines beliebigen Schnittbildes am Beispiel

Der Vorteil sowohl ergänzender Schichtbilder als auch beliebiger Schnittbilder besteht darin, dass innerhalb der Konstruktionsumgebung inhomogene Objektbereiche visualisiert werden. So gesehen sind sie zusätzliche und gestaltende Informationen. Darüber hinaus dienen diese Repräsentationsformen ergänzend an sogenannten kritischen Stellen. Bei technischen Objekten können das vor allem Verbindungs- oder Übergangsstellen verschiedener Bauteile sein. In der Medizin dienen sie zur Visualisierung unterschiedlicher anatomischer Dichtespektren.

3.5.3 Erstellen eines Freiformschnittes

Neben den planaren Schichtbildformen können auch individuell geformte Abbildungsvarianten erzeugt werden. Eine bekannte Variante stellt das aus der Medizin bekannte ORTHOPANTOMOGRAPH, auch Panoramaschichtaufnahme genannt dar [111]. Diese bildet ein Standardverfahren aus der dentalen Radiographie und beschreibt eine zweidimensionale Röntgenaufnahme des Ober- und Unterkiefers. Sie dient grundlegend der diagnostischen Beurteilung knöcherner Strukturen der Mund- und Kieferhöhle (Abbildung 3-27).



Abbildung 3-27: Panoramaschichtaufnahme eines Ober- und Unterkiefers [112]

In der Technik wird die Panoramiaschichtaufnahme zur Begutachtung von beliebig gekrümmten oder rotationssymmetrischen Objekten angewandt. Ebenso ist sie hilfreich bei der computertomographischen Analyse innenliegender Funktionselemente im Werkzeug- und Formenbau oder bei generativen Fertigungsverfahren.

Zur Erzeugung wird mit Hilfe von Selektionswerkzeugen eine Fläche des betreffenden Bereiches anhand von Objektmerkmalen innerhalb einer Schicht (Z_1) definiert (Abbildung 3-28). Dazu erfolgt die Selektion anhand von Spline-Kurven (K_1 bis K_i) entlang des Verlaufs der jeweils begrenzenden Areale. Diese werden, wie bereits bei der Geometrie-assoziierten Eingrenzung erläutert (Abschnitt 3.3.3), über Stützpunkte (SP_1 bis SP_5) definiert. Eine Spline-Selektion erfolgt bei der Panoramaansicht an mindestens zwei Schichtbildern (Z_1 bis Z_i) in unterschiedlichen Positionen des Volumendatensatzes (Abbildung 3-28 b und c). Diese Parameter-Informationen werden als erweiterte Abfrage an die CT-Umgebung überführt. Anschließend erfolgt auf Grundlage der vorliegenden Datenbasis die Zuweisung der Grauwerte über eine trilineare Interpolation. Dadurch wird zwischen definierten Begrenzungskurven ($\cong K_1$ bis K_i) die entsprechende Fläche gebildet. Die Panoramiaschichtaufnahme des selektierten Bereiches wird danach als Antwort an die CAD-Umgebung übertragen (Abbildung 3-28, Schritt d).

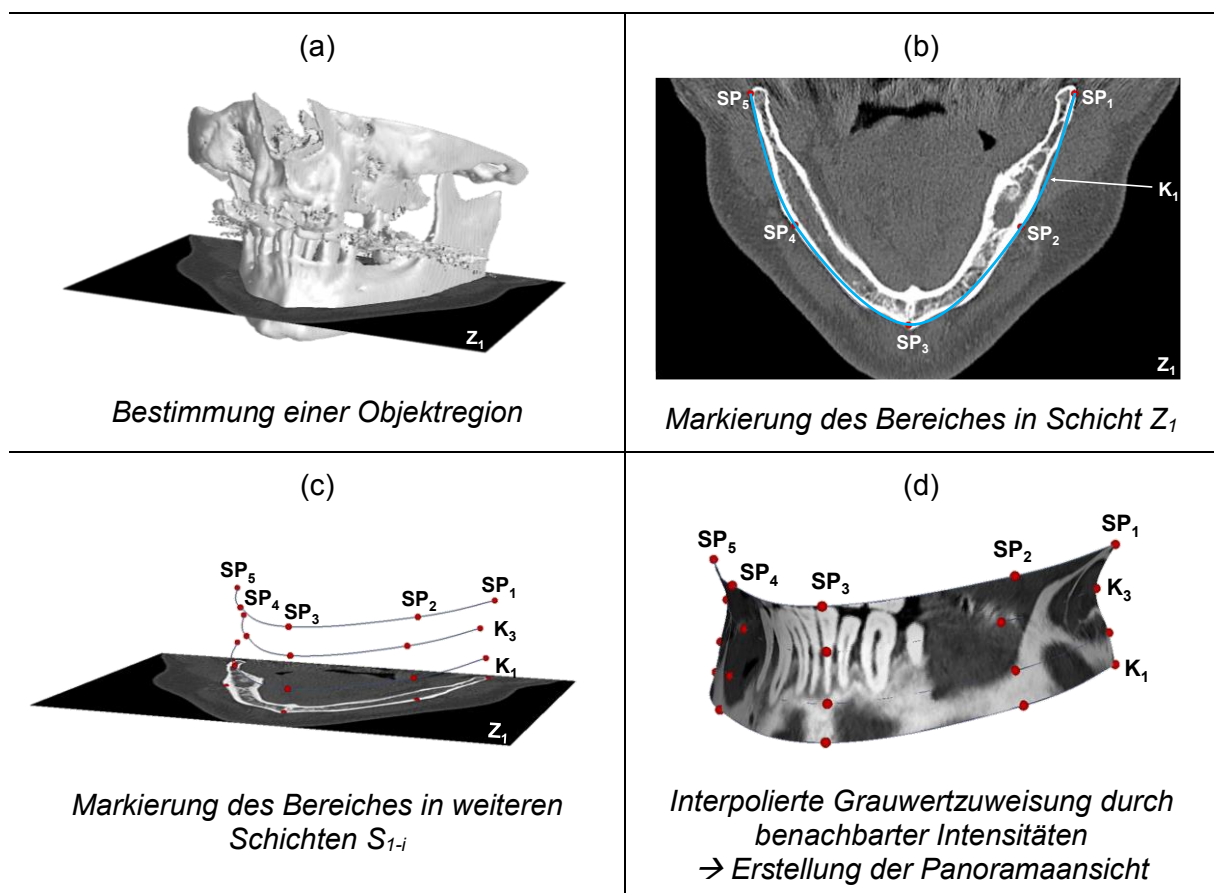


Abbildung 3-28: Schematische Vorgehensweise zur Erstellung einer Panoramaansicht

Im Gegensatz zur bereits etablierten medizinischen Anwendung wird für die Variante eines Freiformschnittes die Untersuchungsregion durch mehrere Panoramaansichten erweitert und somit als dreidimensionale Ansicht dargestellt. Der relevante Vorteil ist hier eine flexible Erweiterung des primär planaren auf einen dreidimensionalen Bereich.

Im Abbildung 3-29 wird an einem industriellen Beispiel diese Repräsentationsform genutzt, um eine gelötete Rohrverbindung auf konsistente Fehlstellen oder Luftpneinschlüsse zu prüfen. Die entsprechende Eingrenzung erfolgt in Anlehnung an die in Abbildung 3-28 verdeutlichte Vorgehensweise über eine Spline-Kurve (K_i), die näherungsweise einen Kreis über mindestens zwei Schichtsequenzen (Z_1 bis Z_i) abbildet. Diese Auswahl erfolgt analog auf zwei diversen Schichtbildsequenzen im Bereich der Lötverbindung, wobei in Abbildung 3-29 exemplarisch nur eine Schicht dargestellt ist. Um einen größeren Bereich des Bauteils abbilden und analysieren zu können, werden komplementär zwei Begrenzungs-Kurven am inneren (BK_i) und äußeren (BK_A) Rand der Rohrverbindung erstellt. Diese werden äquivalent in den gleichen Schichtsequenzen wie die Spline-Kurve selektiert. Zwischen den Kurven wird im Anschluss eine Freiformfläche erzeugt, die schließlich als Panoramaansicht (PA) visualisiert ist. Dadurch wird der später abgebildete Bereich um eine räumliche Perspektive erweitert. Die Lötverbindung kann somit nicht nur punktuell, sondern über die gesamte Rohrbreite analysiert werden. Optional sind durch weitere Schnittbilder entlang der Freiformfläche gegebenenfalls vertiefende Analysen möglich. Die Visualisierung wird abschließend an die CAD-Umgebung als Antwort übertragen und kann mit Hilfe elementarer Messfunktionen im Bedarfsfall weiteren Untersuchungen unterzogen werden. [102]

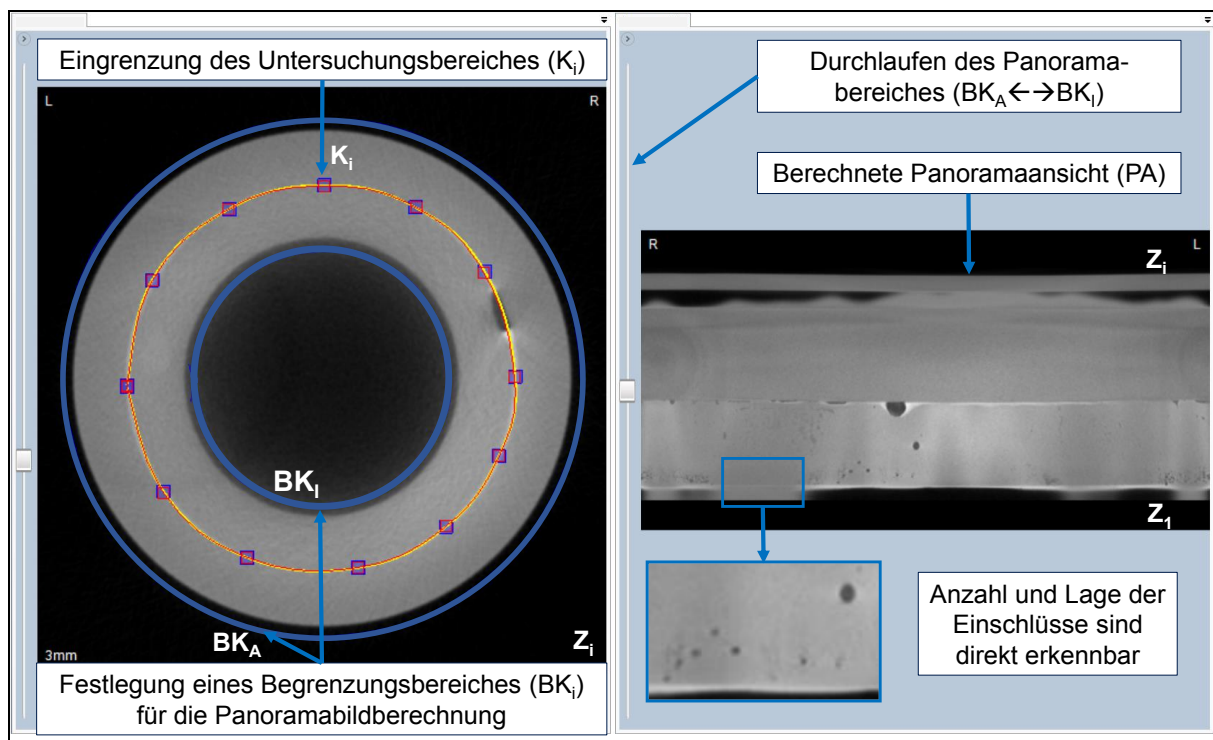


Abbildung 3-29: Erzeugung eines Freiformschnittes zur Analyse einer Lötverbindung - Definition der Bereichsgrenzen (links), Freiformschnittansicht (rechts) (Nach [102])

3.5.4 Kontur- und Geometrieableitung

Um definierte Geometrien aus eingegrenzten computertomographischen Objektinformationen verarbeiten und in der CAD-Umgebung abbilden können, wurde ein Ablauf entwickelt, der die folgenden Punkte in die Prozesskette einbettet. Dieser integriert die abgeleiteten Abfrageformen.

- Beeinflussung der Abbildungseigenschaften
- Segmentierung zur Auswahl der Bereichsgrenzen
- Erstellung diskreter und analytischer Geometrieformen
- Überführung in die CAD-Umgebung

Computertomographische Daten können bezüglich ihrer bildgebenden Eigenschaften von unterschiedlicher Qualität sein. Wesentliche Einflussgrößen der Qualität sind Auflösung, Rauschen und Kontrast der Aufnahmen. Ausgehend von diesen Faktoren erfolgt zunächst eine Analyse und falls erforderlich eine Korrektur der Abbildungseigenschaften. Nachfolgend wird im eingegrenzten Bereich eine detaillierte Segmentierung der gewünschten Objektkonturen vorgenommen. Dieser folgt eine Charakterisierung verschiedener Geometrieelemente, entweder in diskreter oder in analytischer Form. Diskrete und analytische Modellformen werden mit den etablierten Schnittstellen der CAD-Systeme interpretiert und mittels vorhandener Skizzelemente und Konstruktionsreferenzen visualisiert. Trotz Automatisierung einzelner Schritte ist der gesamte Prozess als Unterstützung des Anwenders konstituiert. Bei Bedarf können somit einzelne Phasen individuell und proaktiv beeinflusst werden. Abbildung 3-30 zeigt exemplarisch die Kontur- und Geometrieableitung als kontinuierlichen Ablauf.

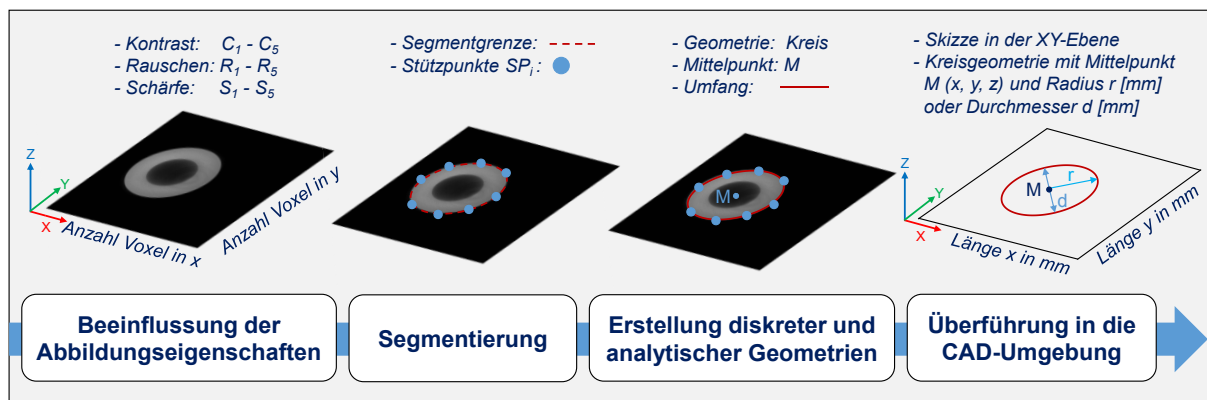


Abbildung 3-30: Methodisches Prinzip zur Kontur- und Geometrieableitung

Beeinflussung der Abbildungseigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften von Bilddaten können mit dem Kontrast, dem Rauschen und der Auflösung beeinflusst werden. Zur Korrektur dieser Einflüsse haben CAD-Systeme bisher jedoch keinen ausreichenden methodischen Bestand. Im Folgenden wird ein Ablauf dargestellt, der anwenderseitig die Einflussfaktoren konfiguriert und optimiert.

Bei diesem Ablauf erfolgt eine Klassifizierung der gewählten Schichtbildsequenz beziehungsweise ihrer Auswahl. Für eine Variation der Qualitätsstufen wird jede Abbildungseigenschaft in fünf Klassen unterteilt, die abhängig von ihrer idealen Abbildungsqualität sind [98]:

- Kontrast (C): C_1 bis C_5
- Rauschen (R): R_1 bis R_5
- Auflösung als Bildschärfe (S): S_1 bis S_5

Die Wertebereiche orientieren sich dabei am jeweils bestmöglichen Ergebnis. Die niedrigste Klasse einer Kategorie repräsentiert diesen Rang. Der höchste Kontrast entspricht dem Symbol C_1 , wenig bis kein Rauschen R_1 und die beste Auflösung ist durch S_1 symbolisiert [46]. Um eine ideale Konstellation zu erhalten, erfolgt initial die Bestimmung einer Basiskonstellation. Dazu werden folgende Definitionen und mathematischen Zusammenhänge angewandt.

Der Kontrast ist nach KALENDER „über die Differenz der Intensität zweier benachbarter Bildpunkte oder Regionen“ [28], wie etwa Objekt und Hintergrund eines Bildes definiert. Diese Differenz wird über folgende Gleichung ermittelt [46]:

$$(3-1) \quad C = \frac{I_O - I_{HG}}{I_O + I_{HG}}$$

C ... Kontrast
 I_O ... Intensität eines Objektes
 I_{HG} ... Intensität des Hintergrundes

Die zufälligen Variationen lokaler Grauwerte bestimmen das Rauschen eines Bildes. Je homogener diese sind, desto geringer ist nach HANDELS das Rauschen [32]. Dem wird das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR-Signal-Noise-Ratio) zugrunde gelegt [19, 31, 113].

$$(3-2) \quad SNR_{CT} = \frac{\bar{P}}{\hat{\sigma}^2}$$

SNR_{CT} ... Signal-Rausch-Verhältnis eines Auswertebereiches
 $\hat{\sigma}^2$... Bildpunktrauschen
 \bar{P} ... Mittlerer Grauwert

mit: $\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (P_i - \bar{P})^2$

Die räumliche Auflösung definiert nach CHRISTOPH / NEUMANN die kleinste und damit gerade noch erkennbare Bildeinheit [29]. Die Faktoren zur Bestimmung des Auflösungsvermögens werden allgemein über die Modulationstransferfunktion (MTF) erfasst [19, 31, 34]. Diese wird über folgende Formel bestimmt [113]:

$$(3-3) \quad MTF_{CT} \approx MTF_{Brennfleck}(u, v) \times MTF_{Fokuswanderung}(u, v) \times MTF_{Detektor}(u, v) \times MTF_{Rekonstruktion}(u, v)$$

(u, v) ... Ortsfrequenz

Das Auflösungsvermögen wird über den Modulationstransfer multifaktoriell beeinflusst. Wie in den Rahmenbedingungen (Abschnitt 3.1.1) formuliert, sind durch den Konstrukteur elementare systemische Parameter, wie etwa der Brennfleck, die Fokuswanderung und die Rekonstruktionsmethoden nicht bekannt und somit auch nicht bestimm- und steuerbar. Demnach wird zur Ermittlung des Auflösungsvermögens äquivalent die Bestimmung der Bildschärfe (S) eingesetzt. Diese kann über den Betrag einer Fouriertransformation, die mit einer Bildpunkt-funktion (PSF, point spread function) des Systems mathematisch gefalten wird, ermittelt werden [19, 31, 46, 56]. Die exemplarische Vorgehensweise zur Bestimmung und Beeinflussung der Abbildungseigenschaften ist in Abbildung 3-31 dargestellt.

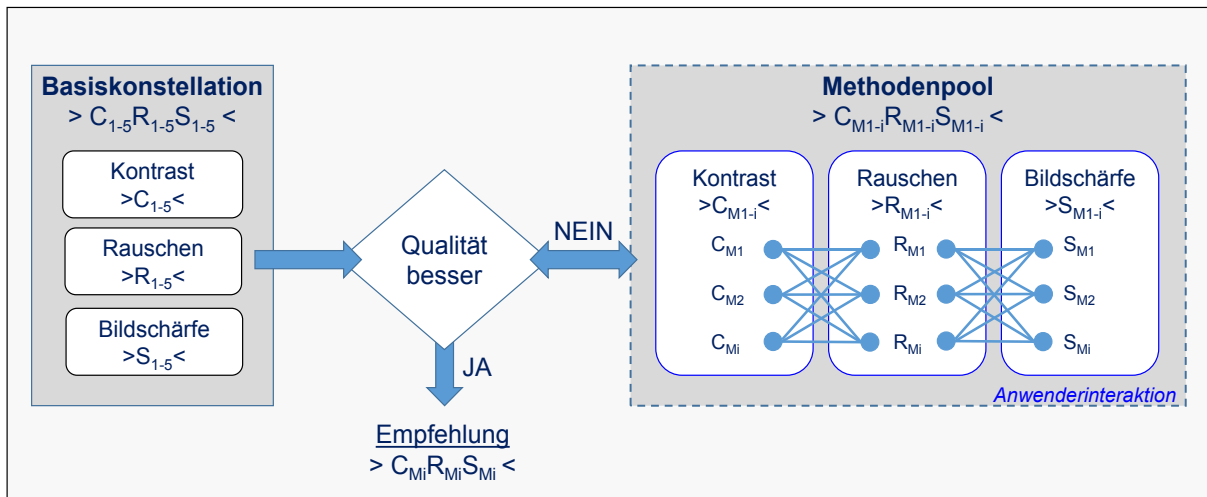


Abbildung 3-31: Exemplarische Vorgehensweise zur Beeinflussung der Abbildungseigenschaften

Um eine ideale Bildqualität zu erhalten, erfolgt zunächst die Bestimmung einer Basiskonstellation. Dabei wird der errechnete Wert jeder Eigenschaft in eine der fünf Qualitätsstufen (C_{1-5} , R_{1-5} , S_{1-5}) eingeordnet und als Status quo und somit als Basiskonstellation eingestuft. Anschließend erfolgt mit jeweils verfügbaren Methoden (C_{M1-i} , R_{M1-i} , S_{M1-i}) zur Optimierung der einzelnen Einflussgrößen eine wiederholte Berechnung und damit die Bestimmung einer Klassifikationsstufe. Jede qualitativ über der Basisstufe stehende Klassifikationsstufe gilt dann als die für die Prozesskette anzuwendende Wertekonstellation. Bei identischer Klassifikationsstufe gilt der Status quo. Die zur Optimierung einer Klassifikationsstufe angewandten Methoden orientieren sich am Stand der Technik und sind im Rahmen einer begleitenden Studie untersucht wurden [98]. Da sich alle dargestellten Abbildungseigenschaften prozessintern beeinflussen, wird der Ablauf für alle ihre Kombinationen und verfügbaren Methoden durchgeführt und konsekutiv qualitativ bewertet. Sind alle Kombinationen durchlaufen, ergibt sich die Empfehlung (C_{Mi} , R_{Mi} , S_{Mi}) mit der bestmöglichen Bildqualität (optimal: C_1 , R_1 , S_1). Die so eruierten Varianten und der jeweils zur Klassifikation errechnete Parameter sind durch den Anwender zusätzlich mit anderen Konstellationen modifizierbar. Entspricht das Ergebnis den gewünschten Anforderungen, wird die Konstellation auf die gewählte Schichtbildsequenz beziehungsweise den eingegrenzten Bereich übertragen. Anschließend erfolgt die Segmentierung und damit die exakte Definition der gewünschten Objektgrenzen.

Segmentierung - Superpixel und Definition der Objektgrenzen

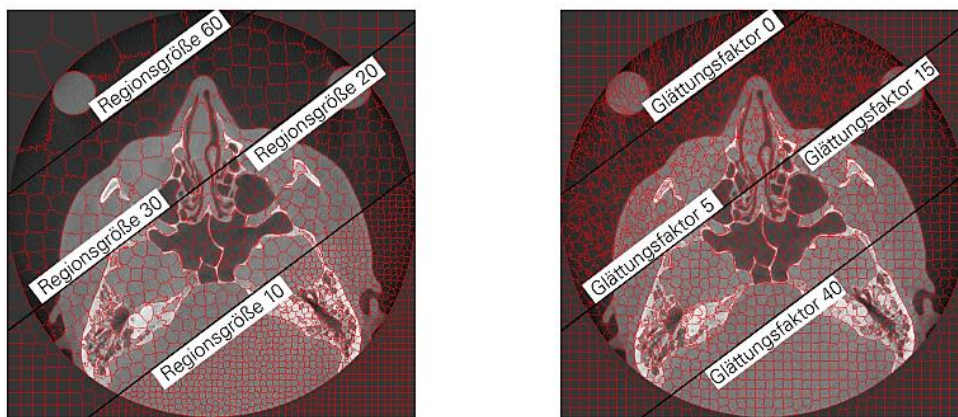
Für eine Segmentierung stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Die Methodenauswahl hat dabei maßgeblichen Einfluss auf das bildqualitative Ergebnis [114]. Insbesondere bei Computertomographien mit einer individuellen hohen Zahl an diversen Objektkonturen und variablen Dichtekoeffizienten ist dies zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde mit den Superpixel-Verfahren eine Methode gewählt, die Bildinformationen in unterschiedliche Kategorien, sogenannte Cluster einteilt. Diese bestehen aus lokal zusammenhängenden Pixeln und ermöglichen eine sowohl geometrische als auch topologische Auswahl des jeweils fokussierten Bereiches [115]. Vergleichende Studien unterschiedlicher Superpixel-Verfahren zeigen dabei mit dem SLIC- (SIMPLE LINEAR ITERATIVE CLUSTERING) Algorithmus vielversprechende Resultate in Bezug auf die Anforderungen variabler computertomographischer Daten

[116, 117]. Dieser zielt darauf ab, Strukturen auf einer extrem feinen Detailebene zu clustern und folglich interaktiv zu analysieren. Der SLIC stellt mehrere Parameter bereit, um einzelne Bildsegmente im Sinne der Fragestellung zu modulieren. Tabelle 3-10 stellt diese Parameter mit ihren jeweiligen Eigenschaften vor und Abbildung 3-32 zeigt ihre Variation anhand der computertomographischen Darstellung einer menschlichen Schädelbasis [114]. Die auszuwählenden Werte der einzelnen Parameter variieren hinsichtlich unterschiedlicher Objekteigenschaften. Dabei sind minimale Objektgröße und Bildqualität signifikante Einflussfaktoren der Anwendung. Analog zur Abbildungsqualität wird bei der Segmentierung ebenfalls eine Empfehlung für ein bestmögliches Ergebnis visualisiert, welches optional korrigierbar ist.

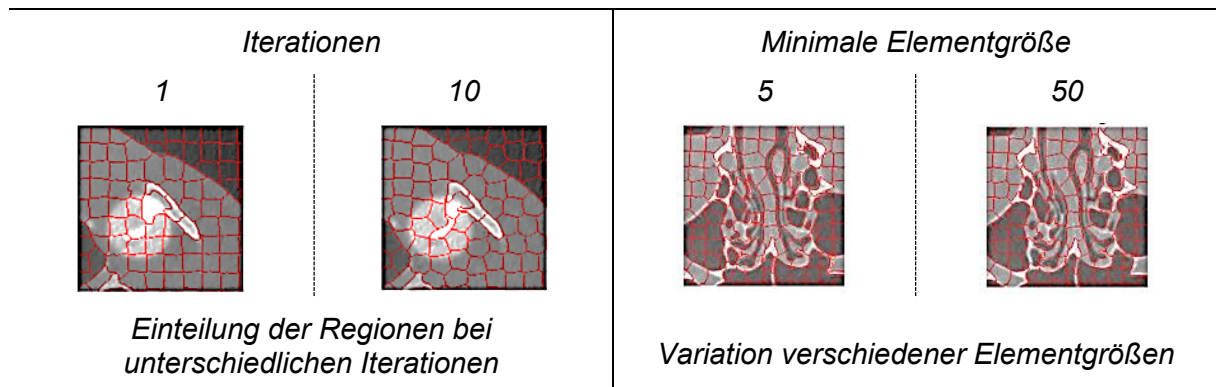
Tabelle 3-10: Parameter des SLIC-Algorithmus [114]

Parameter	Werte	Beschreibung
<i>Regionsgröße</i>	10-100	Arithmetisches Mittel der Superpixel-Segment-Größe
<i>Glättungsfaktor</i>	0-100	Parameter der Superpixelkonsistenz
<i>Iterationen</i>	1-10	Anzahl der Schleifen eines Algorithmus
<i>Minimale Elementgröße</i>	0-100	Minimale Elementgröße, die in ein größeres Superpixel integriert wird (Angabe in Prozent)

Regionsgröße und Glättungsfaktor



Superpixel mit unterschiedlichen Regionsgrößen (links) und variablen Glättungsfaktoren (rechts)



Einteilung der Regionen bei unterschiedlichen Iterationen

Variation verschiedener Elementgrößen

Abbildung 3-32: Parametereinfluss auf die Anwendung der Superpixel in einem Schädel-CT [114]

Das Ergebnis des SLIC-Algorithmus ist eine Anzahl von Segmenten über der Bildfläche (Abbildung 3-33 a). Diese folgt den vorhandenen Objekten oder Bereichen. Die finale Auswahl der jeweils objektzugehörigen Segmente erfolgt anschließend durch den Anwender. Um diese zu erleichtern, werden alle Segmente mit initialen Elementbedingungen zur finalen Auswahl hinzugefügt (Schritt b). Dazu wird das Segment über eine automatische Selektion zu einem unmittelbaren Nachbarsegment oder einem sogenannten erweiterten Auswahlsegment hinzugefügt (Schritt c). Die Abweichung dieser Grenze wird dabei direkt von der mittleren Segmentintensität beeinflusst. Auch hier besteht die Option nutzerspezifischer Korrekturen.

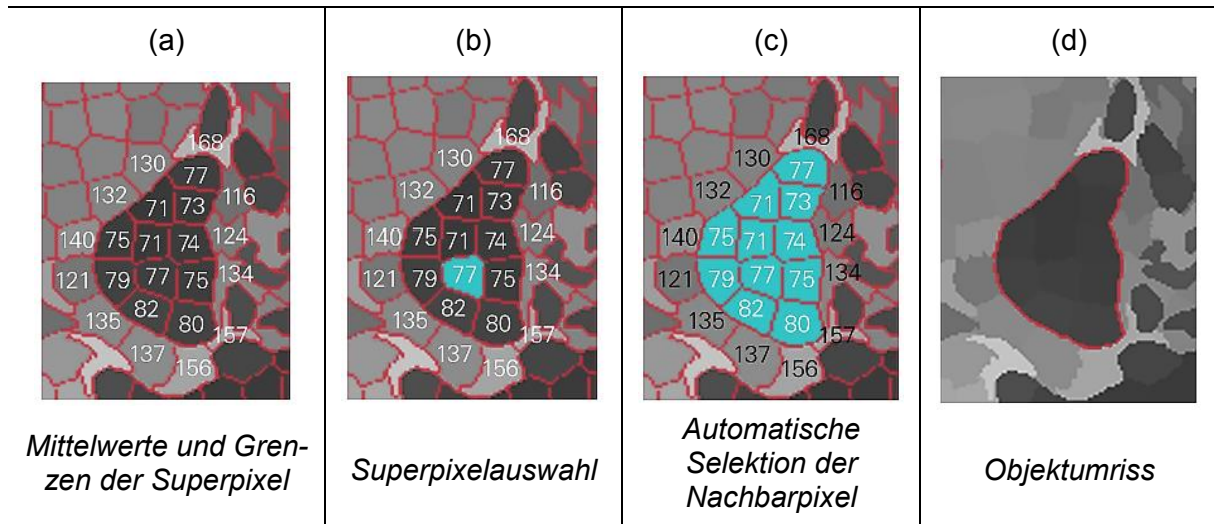


Abbildung 3-33: Schrittfolge zur Auswahl und Eingrenzung eines Objektbereiches [114]

Die Übertragung der Segmentierung auf andere Schichten einer definierten Sequenz kann automatisiert oder manuell korrigiert erfolgen. Mit der Segmentierung entsteht eine Punktmenge, die topologisch Geometrien oder fortlaufende Konturen abbilden. Diese liegen in diskreter Form vor und sind in die CAD-Umgebung (Tabelle 3-5) übertragbar. Über eine selektive Objekterkennung ist die Erstellung analytischer Geometrien möglich.

Erstellung analytischer Geometrieformen

Nach Markierung der Bereichsgrenzen erfolgt die Charakterisierung der Geometrien und des Konturverlaufs. Beide Elemente werden über ihre analytischen Eigenschaften klassifiziert. Die zur Übertragung in die CAD-Umgebung notwendigen Skizzierelemente sind vor allem die allgemeinen Regel- und Freiformgeometrien. Regelgeometrien sind analytische Geometrien auf Basis von Punkten und Linien, die in ebene oder räumliche geometrische Formen transferiert werden können. Jede nicht regelhafte Geometrieform wird definitionsgemäß als Freiformgeometrie bezeichnet. Auch eine Kombination zu sogenannten zusammengesetzten Geometrien ist möglich.

In einer an diese Arbeit angelehnten Testreihe wurden mehrere Methoden zur Bestimmung definierter Geometrieformen untersucht. Ihre Bewertung erfolgte über die Parameter Genauigkeit, statistische Stabilität und Konturerkennung. Analysiert wurden dabei Regelgeometrien mit definierter Streuung ihrer konsistenten Parameter. Im Ergebnis zeigte sich, dass sich der RANSAC-Algorithmus am besten für die Geometrieformerkenung eignet. Dieser liefert eine

hohe Sicherheit gegenüber statistischen Abweichungen. Ebenso zeigt er eine gute Anwendungsperformance. Dies resultiert darin, dass zu Beginn der Analyse nur so viele Daten wie nötig genutzt werden. Wenn es erforderlich ist, wird die Datenmenge sukzessiv erweitert. [114]

Der RANSAC-Algorithmus „wird zum Schätzen von Parametern eines Modells in einer Punktmenge“ angewandt [114, 118]. Dabei wird nach dem Zufallsprinzip die jeweils notwendige Punktmenge ausgewählt, um die bekannten Modellparameter zu berechnen. Die ausgewählten Punkte definieren anschließend das Modell [114]. So werden selektiv die innerhalb einer bestimmten Distanz zum Modell liegenden Punkte ausgewählt. „Für eine bestimmte Anzahl an Wiederholungen werden diese Schritte erneut durchgeführt“ [114]. Die Lösung mit den meisten im Grenzbereich liegenden Punkten ist das Resultat.

Abbildung 3-34 verdeutlicht dieses Prinzip. Dargestellt sind zwei verschiedene Durchläufe mit zufällig gewählten Punktmengen, aus denen sich jeweils die in Blau dargestellten Geraden ergeben. Die innerhalb des Grenzbereiches (G_U und G_O) liegende Punkte sind Grau. Außerhalb liegende Punktmengen, die auch als Ausreißer bezeichnet werden sind Schwarz markiert. Bei einer Wiederholung (links) liegen lediglich drei Punkte (A-C) in den definierten Grenzen, wohingegen bei zwei Wiederholungen (rechts) zehn Punkte (A-J) in den Grenzen liegen. Dieses Ergebnis ist eine über Parameter beschreibbare Geometrieform. [114]

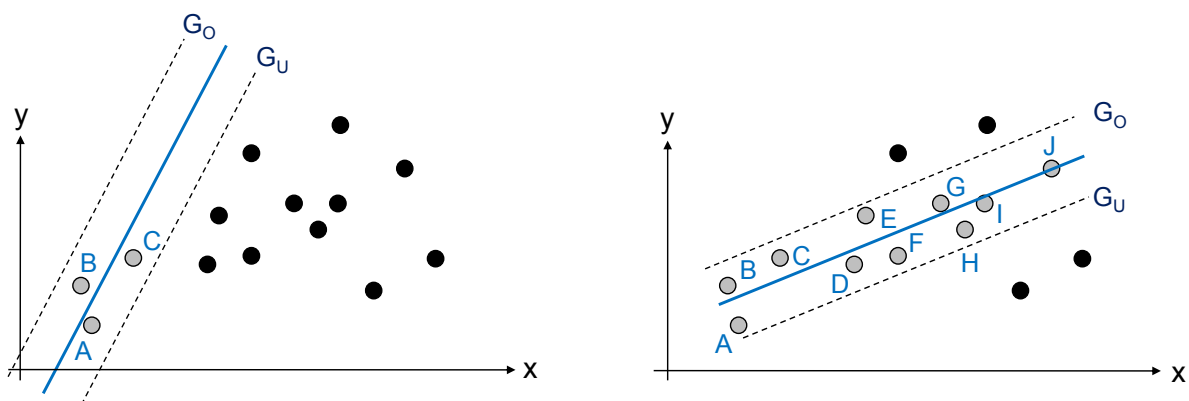


Abbildung 3-34: Erkennung einer Geraden mit dem RANSAC-Algorithmus - eine Wiederholung (links), zwei Wiederholungen (rechts) (Nach [119])

Bei der Erkennung perspektivisch verdeckt dargestellter Geometrieformen wird das Resultat über eine formverwandte Geometrie der unmittelbar benachbarten Schichtbilder generiert [114].

Bestimmung zusammengesetzter Geometrien und freigeformter Kurven

Da erfasste Objekte in der Regel nicht explizit über Primitive beschrieben werden, wird nachfolgend eine Variante zur Bestimmung kombinierter Geometrien (technisch: z.B. Langloch, Nut) vorgestellt. Dabei erfolgt die Zerlegung in einzelne Abschnitte, welche anschließend über Grundgeometrien klassifiziert werden (Abbildung 3-35).

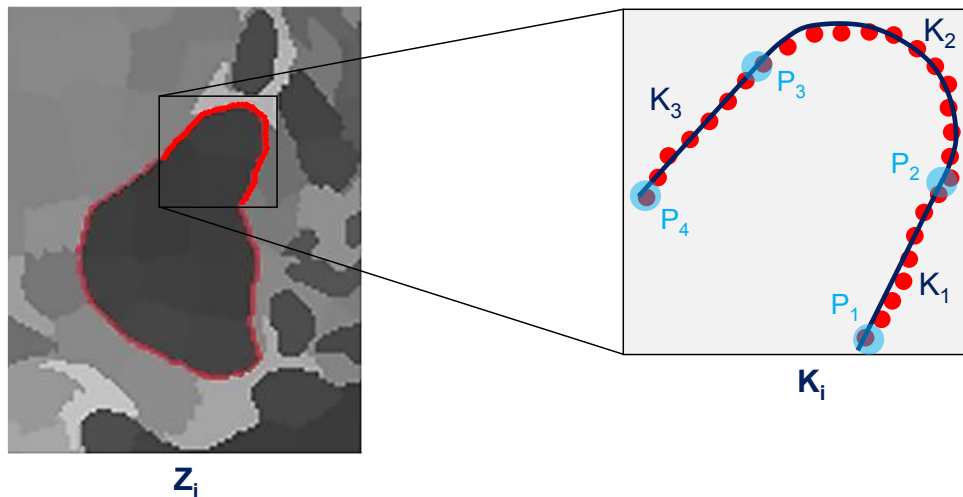


Abbildung 3-35: Definition zusammengesetzter Geometrien durch Segmentation [114]

Dabei ist eine vorbeschriebene Kontur K_i in einer Schicht Z_i gegeben. Diese besteht aus einer definierten Punktmenge und kann anwenderseitig in einzelne Geometrien zerlegt werden. Die Punkte P_1 bis P_4 werden dafür als Grenz- oder Übergangspunkte definiert. Dabei beschreiben drei Konturen K_1 bis K_3 eine Grundgeometrie. Durch Anwendung des RANSAC-Algorithmus werden diese in eine parameterdefinierte Form überführt. Aus der Kontur K_2 wird die Geometrie eines Halbkreises extrahiert. Aus den Konturen K_1 und K_3 werden jeweils Geraden gebildet.

Dieser Vorgang wird durch eine automatische Übertragung der Grenzpunkte in die Kontur K_{i+1} nachfolgender Schichten Z_{i+1} im Bildstapel (Z_{i+j}) beschleunigt. Bei Varianz der Grenzpunktverteilung kann dies durch den Anwender manuell korrigiert werden [114]. Elementares Beispiel hierfür ist eine Adaption des Objektdurchmessers.

Bei zu hohem Freiheitsgrad der Konturen werden die Objektumrisse, welche primär eine Punktreihe abbilden als Freiformkurve interpoliert und analytisch in einen Spline oder optional einen Polygonzug transferiert.

Übertragung in die CAD-Umgebung

Wurden alle Geometrieformen bestimmt, erfolgt die Übertragung der Antwort an die CAD-Umgebung. Dabei werden, nach dem Prinzip der Datenüberführung (Abschnitt 3.4) neben den geometrischen Eigenschaften auch ihre Transformationsparameter übergeben.

In der CAD-Umgebung wird jede Geometrieform einschichtig auf einer Referenzebene in Gestalt eines Skizzenelements übermittelt. Handelt es sich um Freiformgeometrien, werden diese als Punktfolge mit entsprechender Kurvenmorphologie übergeben. Der Konstrukteur kann die interpretierten Geometrien optional als Modell- oder Konstruktionsreferenz determinieren. Über die CAD-Skizzierfunktionen wird so ein räumliches Objekt generiert.

Abbildung 3-36 zeigt die komplette Abfolge aus Segmentierung, Bereichsauswahl und Konturierung am Beispiel einer Nasennebenhöhlen-Computertomographie. Die abgeleitete Abfrage

besteht aus der Detektion des Konturbereiches über einen ausgewählten Schichtbildsequenzbereich (Z_i bis Z_{i+30}). Die entsprechende Antwort wird durch die Übertragung und Interpretation in die CAD-Umgebung gegeben.

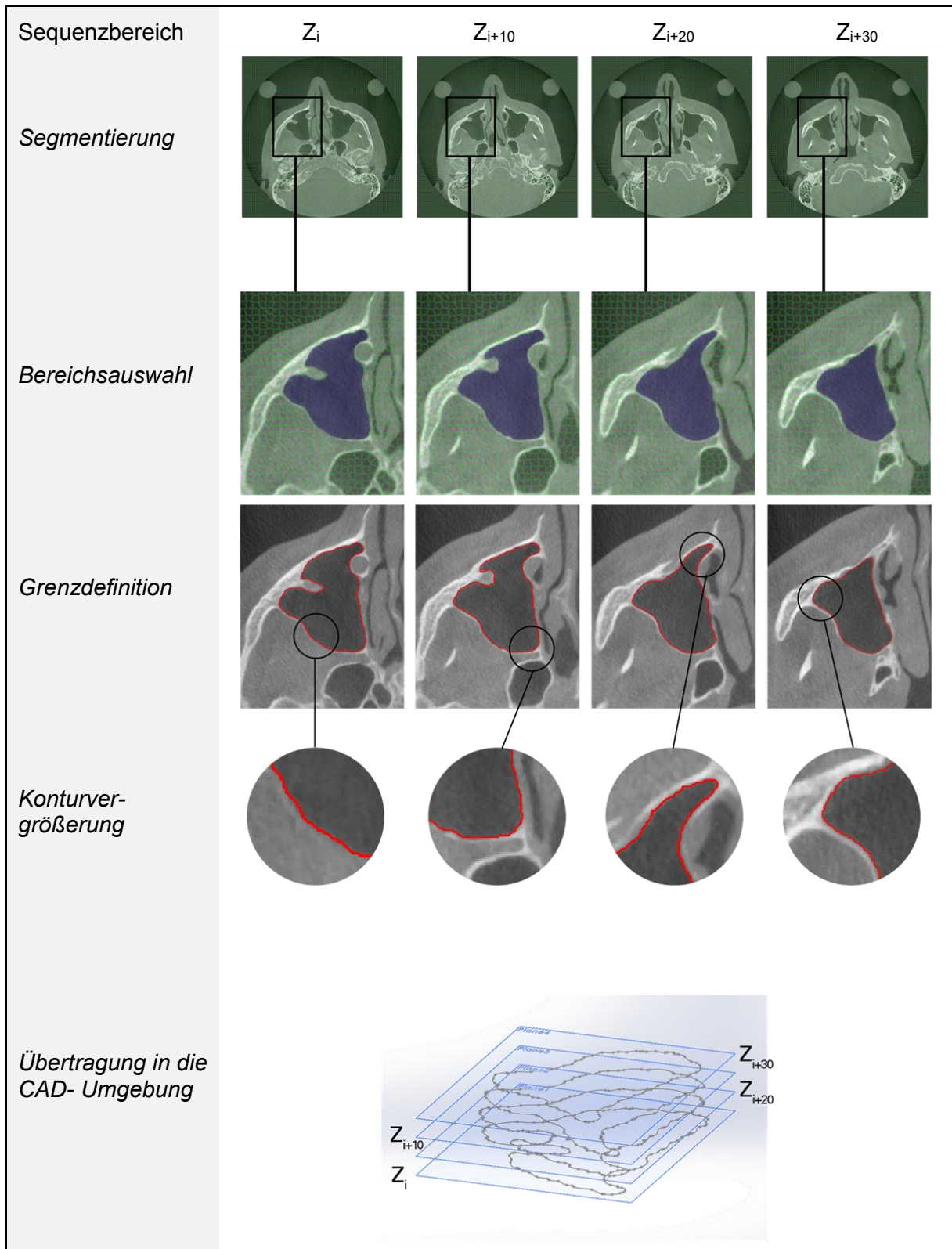


Abbildung 3-36: Nasennebenhöhlen-CT – Beispiel einer Kontur- und Geometrieableitung [114]

3.5.5 Partiiell oberflächenbasierte Modellerstellung

Eine weitere abgeleitete Abfrageform ist die Erstellung partiell dreidimensionaler Objektbereiche in Form diskreter Oberflächenmodelle. Diese werden als Repräsentationsform innerhalb der Prozesskette angewandt, um selektive Dichtebereiche visuell unterstützend während der Modellierung zu generieren.

Abbildung 3-37 zeigt exemplarisch und vereinfacht den methodischen Prozessablauf zur Bestimmung einer lokal oberflächenbasierten Modellstruktur. Dieser erfolgt sequenziell und mit Ausnahme der geeigneten Schwellwertbestimmung automatisch. Den Ausgangspunkt bildet ein limitierter Schichtbildbereich auf Grundlage der vorgestellten Datenbasis (Abschnitt 3.3.1).

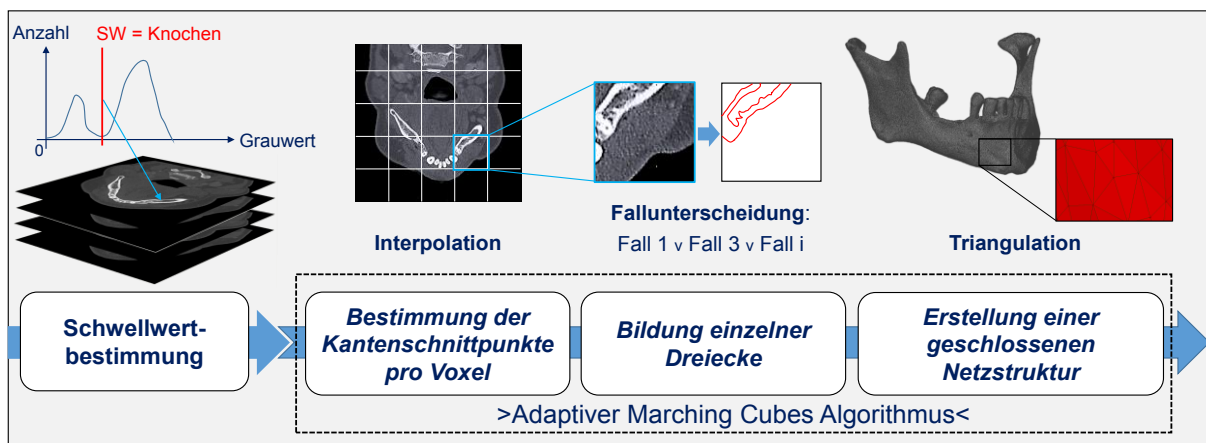


Abbildung 3-37: Allgemeine methodische Prozesskette zur Erstellung partieller Oberflächenmodelle

Zur Optimierung der Ergebnisqualität erfolgt zunächst eine Verbesserung der Abbildungseigenschaften nach dem zu Beginn in Abschnitt 3.5.4 vorgestellten Prinzip. Basierend auf den Ergebnissen erfolgt die Bestimmung eines lokalen Schwellwertes. Mit Hilfe eines angepassten MARCHING CUBES-Verfahrens werden zunächst alle Kantenschnittpunkte der einzelnen Voxel bestimmt. Aus den entstandenen Dreieck-Voxel-Konstellationen erfolgt im Weiteren eine Fallunterscheidung. Abschließend wird über eine Triangulation³⁹ aus den einzelnen Dreieckskonstellationen eine homogene, geschlossene Netzstruktur gebildet.

Lokale Schwellwertbestimmung

Zur Bestimmung des Schwellwertes wird innerhalb des eingegrenzten Bereiches ein gemeinsamer Grauwert der zu detektierenden Dichteregion gesucht. Basierend auf dem Ausgangszustand ist die Schwellwertbestimmung sowohl objektseitig als auch hinsichtlich des Dichtespektrums limitiert. Demnach wird durch die Nutzung des OTSU-Verfahrens über eine Histogramm-Analyse die Grauwertvarianz analysiert und der entsprechende Schwellwert über Häufigkeitsverteilungen skaliert [120]. Dies erfolgt über die Bestimmung des maximalen Quotienten zwischen den Varianzen zweier Grauwertanhäufungen [30]. Der so algorithmisch ermittelte

³⁹ Triangulation: Ist die häufigste Form der Tessellierung und bezeichnet die Vernetzung von 3D-Punkten einer Punktwolke zu einem Dreiecksnetz.

Wert kann daraufhin noch manuell über eine angelegte Grauwertskala variiert werden. In Abbildung 3-38 ist ein Beispiel zur Anwendung des OTSU-Verfahrens veranschaulicht.

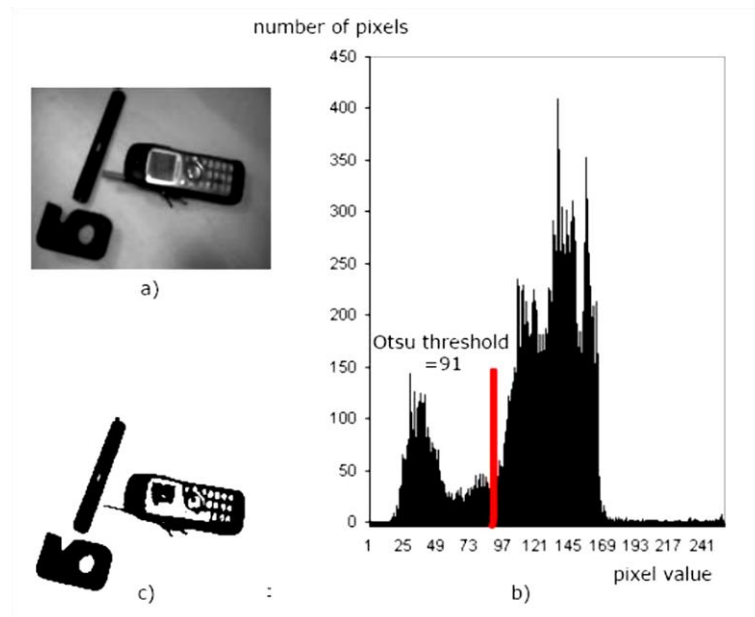


Abbildung 3-38: Schwellwertbestimmung nach OTSU: (a) Ausgangsbild, (b) Histogramm mit ermitteltem Schwellwert, (c) Ergebnisbild nach Anwendung des Schwellwertes [121]

Funktionsweise des MARCHING CUBES ALGORITHMUS

Zur Erstellung einer diskreten Oberflächenmodellstruktur wird als Standardverfahren zur Oberflächenerzeugung der MARCHING CUBES ALGORITHMUS von LORENSEN UND CLINE [110] eingesetzt. Abbildung 3-39 verdeutlicht die Funktionsweise exemplarisch an einem Voxel.

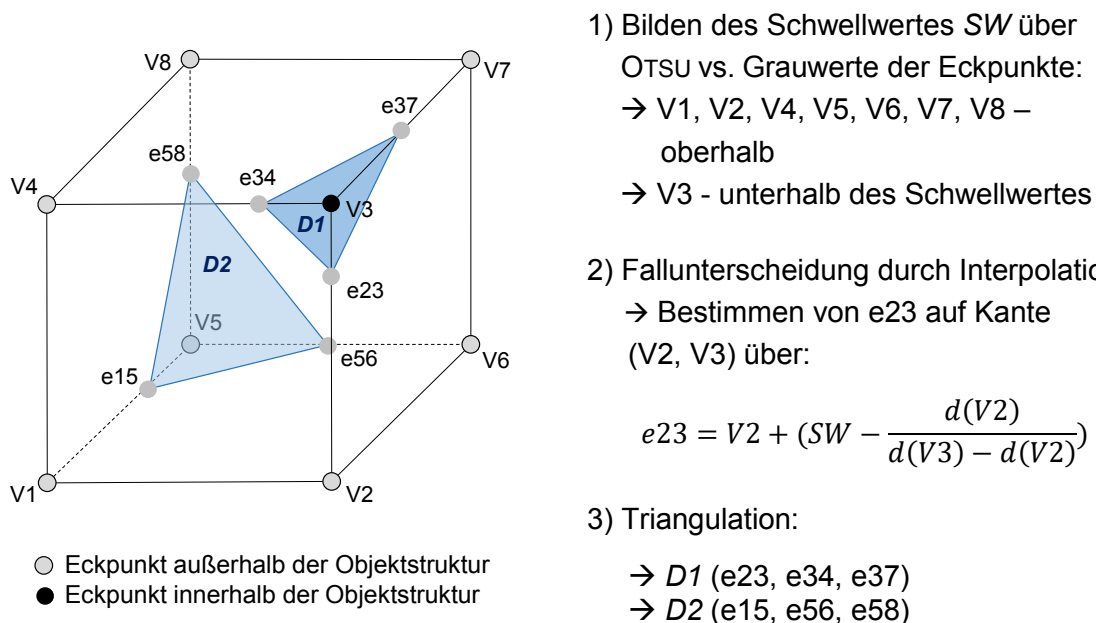


Abbildung 3-39: Funktionsweise des MARCHING CUBES ALGORITHMUS am Beispiel eines Voxels (Nach [49, 63]; Bezeichnung Nach [110])

Dabei wird der festgelegte Schwellwert auf die dreidimensionale Matrix-Struktur (Datenbasis) der eingegrenzten Volumensequenz angewandt. Auf diese Weise werden die Voxel von jeweils zwei aufeinanderfolgenden Schichten betrachtet. Nach KROLL wird dabei „jedes Voxel als grauwertbehafteter räumlicher Punkt gesehen“ [30]. Somit wird konsekutiv das gesamte Voxelvolumen als Punktgitter betrachtet [32]. Bei diesem Verfahren werden die Grauwerte der acht Eckpunkte ($V1-V8$) jedes einzelnen Voxels verglichen (Abbildung 3-39, Schritt 1). Hierbei ist relevant, ob diese innerhalb oder außerhalb des definierten Schwellwertes (SW) liegen. „Ist der gegebene Schwellwert kleiner als der Grauwert einer Ecke, befindet sich diese im Inneren des Objektes. Liegen die Grauwerte zweier benachbarter Ecken nicht beide über oder unter dem Schwellwert, befindet sich ein Oberflächenpunkt des Objektes auf der verbindenden Kante“ [30]. Anschließend wird die genaue Lage aller Kantenschnittpunkte ermittelt. Als Subvoxelgenauigkeit wird dabei die lineare Interpolation des Grauwertes entlang der Eckpunkte mit jeweils unterschiedlicher Grauwertintensitäten bezeichnet (Abbildung 3-39, Schritt 2). Aus den berechneten Kantenschnittpunkten (e_{mn}) werden folglich die einzelnen Dreiecke (D_i) gebildet (Abbildung 3-39, Schritt 3). Für jede Voxelkonfiguration wird eine Polygonbeschreibung generiert, die angibt, in welche Form die Objektflächen den Quader schneiden [32]. Diese kann nach LORENZEN UND CLINE in fünfzehn topologische Varianten anschließend für eine Triangulation unterschieden werden (Abbildung 3-40).

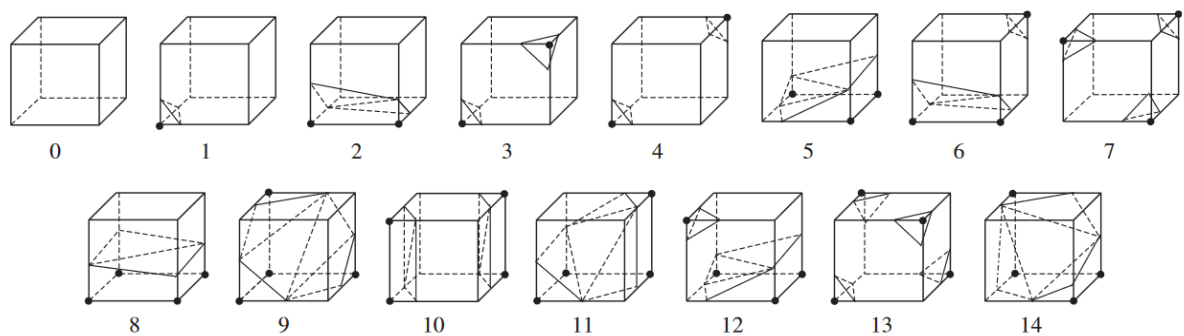


Abbildung 3-40: Voxelkombinationen, die beim MARCHING CUBES ALGORITHMUS unterschieden werden ([122], Nach [110])

Das Ergebnis ist eine Gliederung, in der neben den Eigenschaften der Datenbasis die Koordinaten der Dreieckspunkte und die Normalenvektoren enthalten sind [63]. Das visuelle Resultat, das heißt die Antwort, ist eine geschlossene Polygonfläche, welche die Oberfläche des zu extrahierenden Objektes beschreibt.

Der MARCHING CUBES ALGORITHMUS stammt ursprünglich aus den späten achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts, also aus einer Zeit mit begrenzter Datenmenge und Bildauflösung. Bei heute wesentlich gestiegenen Anforderungen an die erfassenden Objekte, vor allem in der industriellen Computertomographie, sind dem originalen Verfahren nunmehr Grenzen gegenüber einer robusten und vielfältigen Anwendung gesetzt [30, 55, 63, 123]. Hinzu kommt die fortschreitende Entwicklung der Rechentechnik, die wiederum neue Möglichkeiten der Datenverarbeitung zulassen. Die hier entwickelte Prozesskette dient der Repräsentation eines partiell ausgewählten Bereiches über diskrete Oberflächenmodelle. Dazu werden nachfolgend drei primär methodische Defizite des MARCHING CUBES ALGORITHMUS mit ihrer jeweils prozessbezogenen Lösung beschrieben [30, 63, 122, 123]:

- Mehrdeutigkeiten
- Scharfe Ecken und Kanten
- Heterogene Netzdichten

Grundsätzlich existiert ein Mehrdeutigkeitsproblem. So gibt es bei der Modellerzeugung geometrisch-topologische Abbildungsfehler (z.B. Löcher). Ursache hierfür ist die Auswahlspezifik bei der Fallunterscheidung im Zuge der Triangulation (Abbildung 3-40). Zudem werden bei besonders inhomogenen Dichtespektren scharfe Ecken und Kanten nur unzureichend dargestellt. Einen weiteren Nachteil stellen die besonders auf großen Oberflächen entstehenden vielfältigen Polygone dar. Diese führen zu ausgeprägten heterogenen Dreiecksverteilungen und divergenten Netzdichten und schließlich zu enormen Datenmengen der erzeugten Objektrepräsentationen.

Mehrdeutigkeiten treten an Stellen auf, an denen alle vier Kanten einer Voxelseite Eckpunkte von Dreiecken haben [63]. Die Lücke bei der Modellerzeugung entsteht dabei durch die unterschiedlichen Verbindungen der vier Schnittpunkte auf der gemeinsamen Fläche zweier aneinandergrenzender Voxel [63]. Ebenso ist das Auftreten von internen Mehrdeutigkeiten möglich, wo an zwei Eckpunkten Dreiecke mit gleicher Ausrichtung gebildet werden [124]. Abbildung 3-41 zeigt dies beispielhaft für den 4. Fall des ursprünglichen Algorithmus.

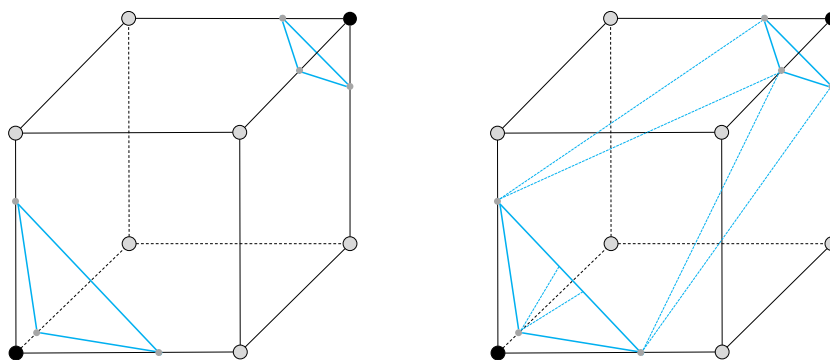


Abbildung 3-41: Möglichkeiten der Triangulation bei interner Mehrdeutigkeit am MC-Fall 4 (Nach [122, 124])

Für eine Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems wird der MARCHING CUBES 33-Ansatz nach CHERNYAEV verfolgt. Dieser erweitert zur Triangulation definitionsgemäß von fünfzehn auf dreiunddreißig Fallunterscheidungen [124, 125]. Zur Bestimmung der Kantenschnittpunkte wird dabei anstelle der linearen Interpolation zwischen den beiden Eckpunkten eine trilineare Interpolation über die angrenzenden Voxel verwendet. Dieser Vorgang verstärkt jedoch zusätzlich die unzureichende Darstellung scharfer Ecken und Kanten. Dementsprechend erfolgt eine Überprüfung der Voxel, in denen diese Kantenformen optional auftreten. Im Gegensatz zum bisherigen Ablauf werden dabei die Schnittpunkte nicht miteinander verbunden. Mit Hilfe eines erweiterten MARCHING CUBES-Ansatzes (EXTENDED MARCHING CUBES ALGORITHM) nach KOBELT ET AL wird ein zusätzlicher Feature-Punkt generiert (Abbildung 3-42) und mit den anderen Dreiecken aus der Triangulierung zu einer Pyramide ergänzt (links) [126]. Die Konstellation erzeugt zunächst eine gegenteilige Wirkung (mitte), jedoch erfolgt anschließend eine Kantendrehung des Netzes. Dies hat eine Vergrößerung des Innenwinkels der Dreiecke zur Folge und bildet letztlich eine geometrisch eindeutige Kantendarstellung (rechts). [63]

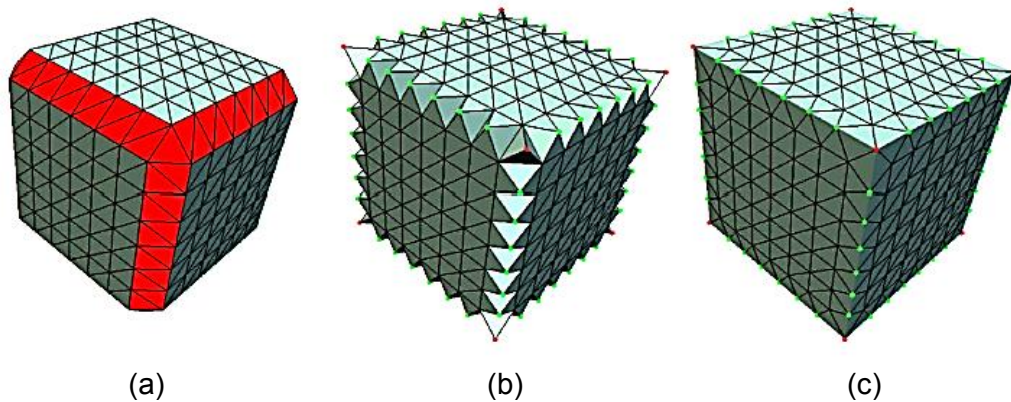


Abbildung 3-42: Flächenstücke, in denen (a) ein möglicher Feature-Punkt ausgewählt wurde, (b) zusätzlich generierte Feature-Punkte, (c) Resultierende Kante nach der Drehung [126]

Der MARCHING CUBES ALGORITHMUS verläuft prozessual voxelweise. Es entstehen für jeden oberflächlich tangierten Voxel mehrere Dreiecke [123]. Die daraus entstehende Netzstruktur beinhaltet demnach unterschiedlich dichte Oberflächen mit einer dementsprechend hohen Anzahl an Dreiecken, was durch die Anwendung des MARCHING CUBES 33-Ansatzes weiter erhöht wird. Dies führt zwangsläufig auch zu einer erheblichen Zunahme des Speicherbedarfs [30]. Zur Lösung dieses Problems werden Flächenelemente mit gleichen oder ähnlichen Eigenschaften zu jeweils größeren Elementen zusammengefasst. Lediglich Flächenbereiche mit Übergängen wie Kanten, Radien oder auch Fasen werden individuell definiert und hochauflösend visualisiert [126]. Abbildung 3-43 zeigt beispielhaft eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Vernetzungsarten und deren Qualitäten.

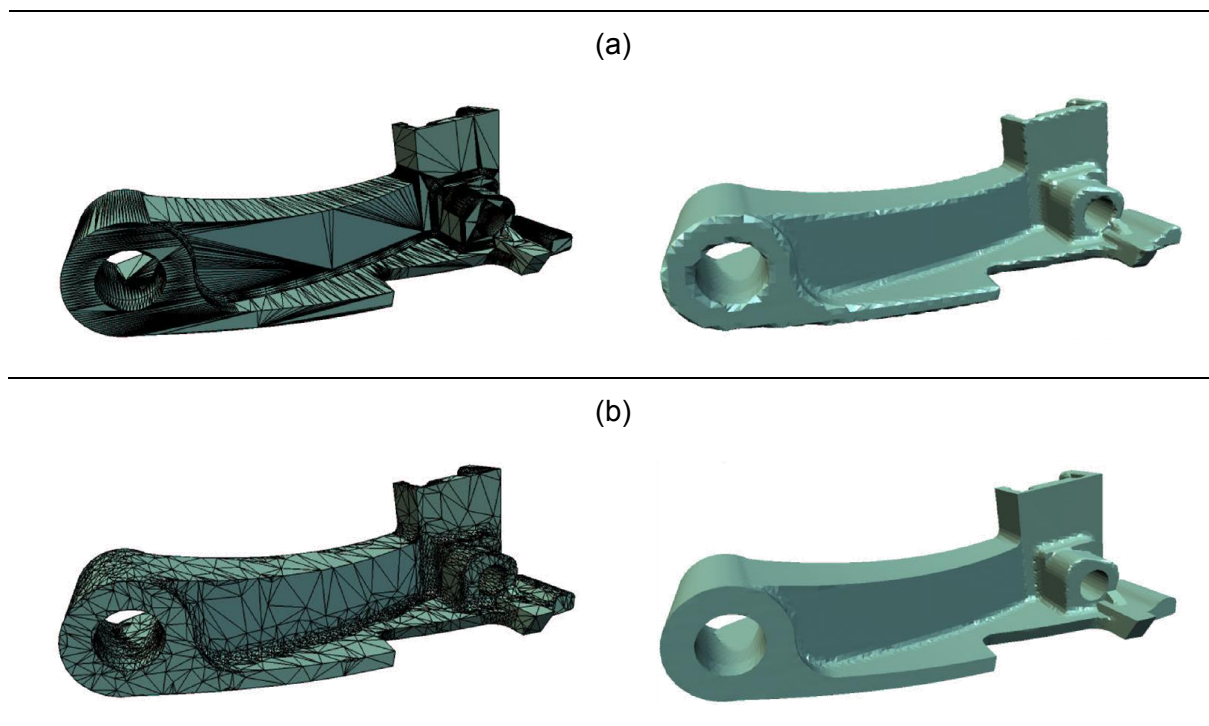


Abbildung 3-43: Vergleich unterschiedlicher Vernetzungsarten eines Polygonmodells - (a) MARCHING CUBES Standardverfahren, (b) Erweiterter MARCHING CUBES mit optimierter Netzstruktur (Nach [126])

Für die erläuterten Defizite finden sich in der aktuellen Literatur noch weitere Lösungswege [30, 63, 122, 123]. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Methoden orientieren sich in erster Linie an einem prozessual störungsfreien Ablauf mit insgesamt kalkulierbaren Folgen. Weitere systemisch relevante Nachteile, wie etwa fehlende bereichsabhängige Oberflächenerzeugungen und fragmentarisch verrauschte Objektbereiche werden bereits über alternative Lösungsansätze im Zuge der Prozesskette ausgeschlossen [30].

Abbildung 3-44 zeigt den prozessualen Ablauf zur Generierung einer partiellen Oberflächenrepräsentation als abgeleitete Abfrageform anhand eines menschlichen Unterkieferknochens. Hierbei wird das Übergangsareal zwischen originärer Spongiosa und angefertigtem Implantat gezeigt, um die operativ notwendigen Fixationspunkte zu visualisieren und folglich deren Befestigungen zu konstruieren.

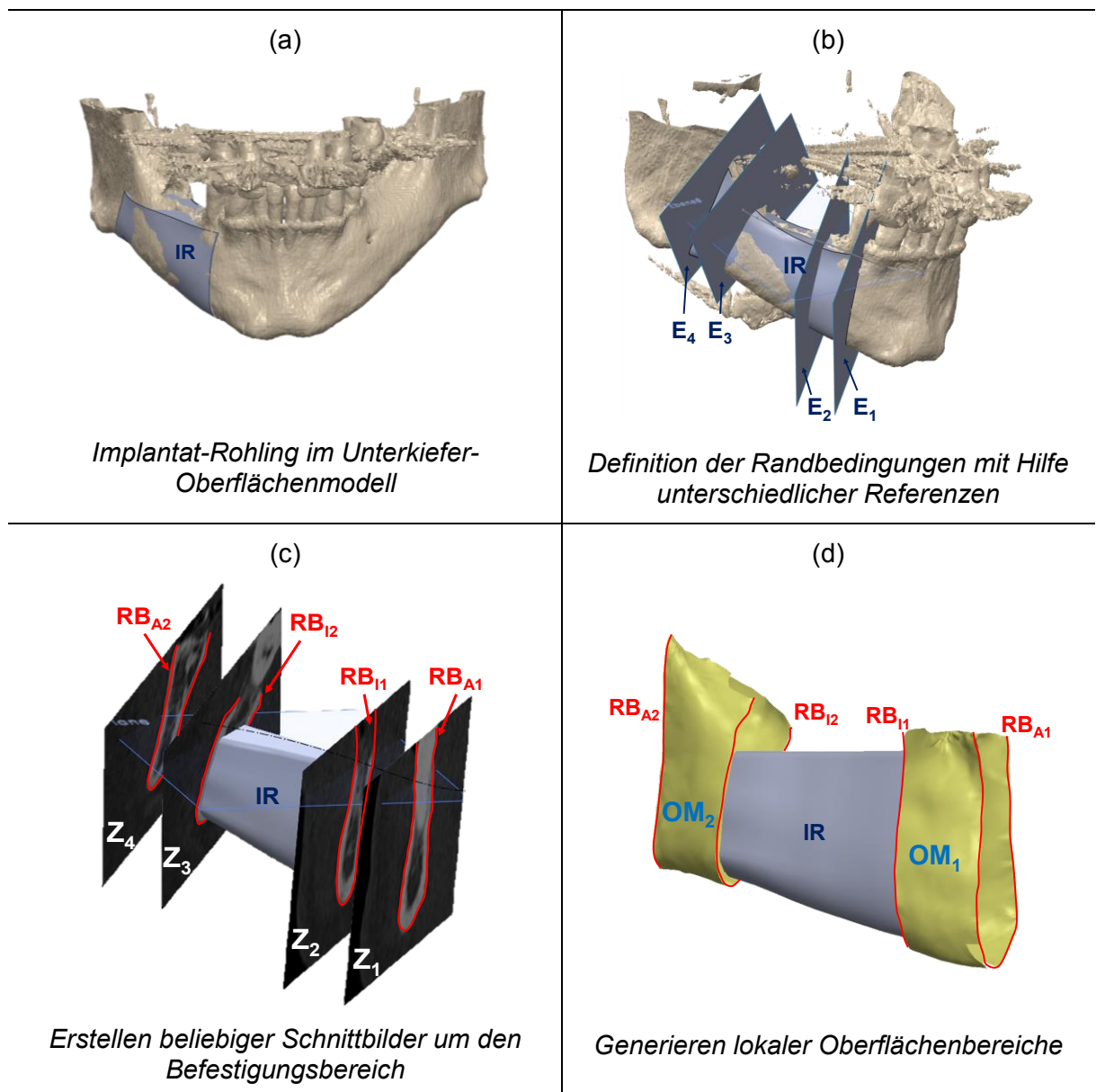


Abbildung 3-44: Erstellung eines lokalen Oberflächenmodells zur besseren Gestaltung der Anbindungsbereiche bei der Konstruktion eines Unterkieferimplantats [127]

Den Ausgangszustand bildet ein Implantat-Rohling (IR), der bereits aus dem vorliegenden Patientendatensatzes erstellt werden konnte (a). Der Rohling repräsentiert die Größe, Struktur und räumliche Orientierung des zu ersetzenden Unterkieferbereiches. Dabei wurden die Randbedingungen wie Schnittebenen (E_1 bis E_4) und potenzielle Befestigungsbereiche durch den Arzt definiert und über einen vorgelagerten Planungsschritt übertragen (b) [18]. Basierend auf den Schnittbereichen, welche im vorliegenden Fall äquivalent zu den bereits definierten Referenzebenen (RE_1 bis RE_4) verwendet werden können, erfolgt die Erstellung jeweils beliebige Schnittbilder (Z_1 bis Z_4) (Abschnitt 3.5.2) aus der CT-Umgebung (c). Diese dienen einerseits dazu die regionalen Rahmenbedingungen wie Knochenstruktur und -dicke besser analysieren zu können. Andererseits um den gewünschten Bereich begrenzen zu können. Über den Schwellwert (SW) der gesuchten Knochenstruktur und den definierten Eingrenzungen (RB_{I1} , RB_{I2} ; RB_{A1} , RB_{A2}) wird seitlich jeweils ein partielles Oberflächenmodell (OM_1 , OM_2) generiert und in der CAD-Umgebung als Antwort visualisiert (d). Durch die zahlreichen Möglichkeiten der Referenz- und Repräsentationsformen-Erstellung, welche in diesem Kapitel vorgestellt wurden, können grundsätzlich unterschiedliche Variationen genutzt werden, um individuelle Bereiche als diskrete Oberflächenrepräsentation zu definieren.

Ebenso werden komplexe begleitende Strukturen, wie etwa Blutgefäße und periphere Nerven oder auch Änderungen der Knochenstruktur in der Visualisierung berücksichtigt (Abbildung 3-43 c) [127]. Zudem können patientenindividuelle Eigenschaften besser an den Implantat-Rohling modelliert werden, wie beispielsweise [128]:

- Befestigungen: Schraubenart und -größe, -winkel, -ort sowie die Tiefe
- Operationswerkzeuge: Bohrhülsen zur exakten Positionierung des Bohrloches während der Operation
- Funktionsintegration: Befestigungshülsen der Zahnimplantate auf Basis der Oberkieferstruktur

In der Vielfalt und Variabilität der Darstellungsmöglichkeiten besteht ein primärer Nutzen der entwickelten Prozesskette [129].

4 Applikation und exemplarische Anwendung

4.1 Technische Realisierung

Für eine effektive Umsetzung des vorgestellten Konzeptes können in CAD-Systemen anwendungsspezifische Funktionen erstellt und integriert werden. Bezüglich der Art ihrer Integration in oder am CAD-System existieren drei Optionen (Abbildung 4-1 und Tabelle 4-1) [65, 79, 130]:

- Makro-Editor
- Add-In-Option
- Individuelle Anwendung (Stand Alone)

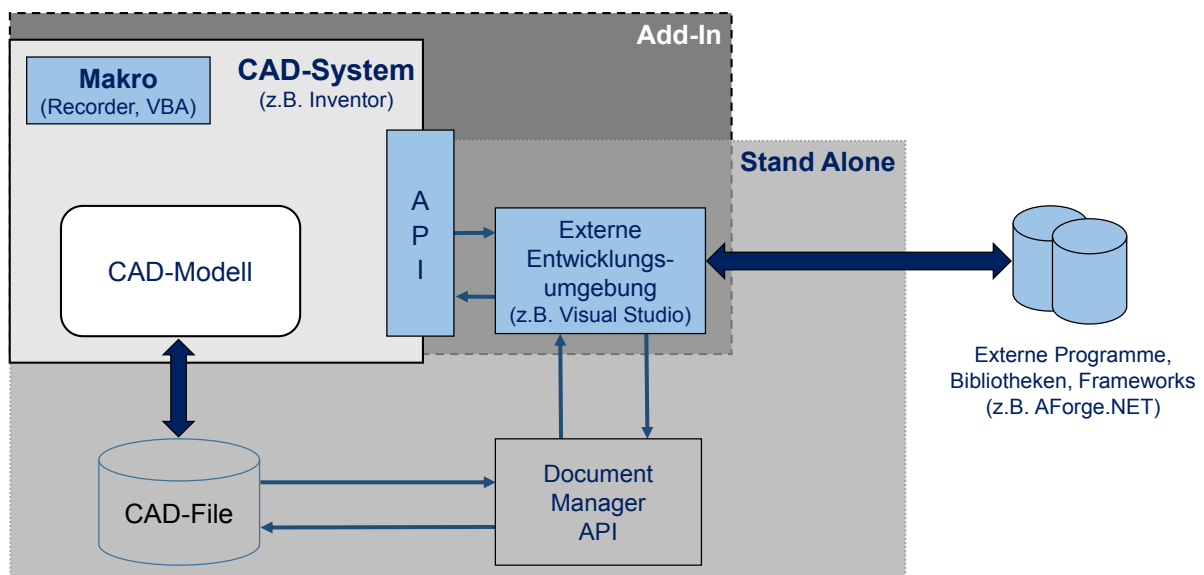


Abbildung 4-1: Optionen zur Erstellung nutzerspezifischer Anwendungen von CAD-Systemen (Nach [65])

Eine Vielzahl von CAD-Systemen bieten die Möglichkeit, auf Basis der Systemfunktionen automatisierte Abfolgen zu erstellen. Dies erfolgt in der Regel objektorientiert mit Hilfe eines Makro-Editors (Recorder). Dabei werden bestimmte Funktionsfolgen bei der Modellierung aufgezeichnet und anschließend auf andere Bauteile angewandt. Das Ziel ist eine automatisierte Anwendung sich wiederholender Arbeitsschritte. Neben der alleinigen Aufzeichnung besteht die Möglichkeit, programmgesteuerte Funktionsbausteine über die Skriptsprache VISUAL BASIC FOR APPLICATIONS (VBA) zu erstellen oder bereits aufgezeichnete Chronologien anzupassen. [65, 130]

Eine Add-In-Option ist die Erweiterung der CAD-Umgebung um anwendungsspezifische Funk-

tionen (Unterprogramme). Der Zugriff auf das CAD-System erfolgt über eine Programmierschnittstelle, wobei zusätzliche Funktionen direkt in das CAD-System integriert werden. Neben individuell erstellten Funktionen verwendet ein Add-In nahezu alle systemischen Werkzeuge wie etwa Visualisierungsfunktionen oder Importschnittstellen. Diese Anwendungsform ist nicht ohne die CAD-Umgebung nutzbar.

Im Gegensatz zum Add-In ist die Stand-Alone-Anwendung eine komplett eigenständige Applikation, die an ein CAD-System angebunden wird. Sie kann als Plugin über die vorgenannte Programmierschnittstelle auf die internen Funktionsbausteine des Modellersystems zugreifen. Dies geschieht system- objekt- oder strukturseitig. Eine optional methodische Ergänzung ist durch bereits vorhandene Bibliotheken (z.B. Frameworks) gegeben [98]. Die Erstellung einer Stand-Alone Anwendung im CAD- oder CAE-Umfeld erfolgt vor allem, um vorhandene Systemschnittstellen zu schließen. Damit besteht eine direkte und primär kommunikative Verbindung, deren Folge eine im Ablauf vereinfachte Prozesskette ist.

Die Programmierschnittstellen aktuell gängiger CAD-Umgebungen werden mit einer Schnittstelle zum Microsoft DotNet-Framework (.NET-Framework) über eine externe Entwicklungsumgebung (z.B. Microsoft Visual Studio) gesteuert und mit Hilfe verschiedener Programmiersprachen (z.B. VB, C#)⁴⁰ entwickelt [65, 79, 130].

Tabelle 4-1: Technische Umsetzungsmöglichkeiten des Konzeptes [65, 79, 130]

Arten	Makro	Add-In	Stand-Alone
<i>Vorteile</i>	Entwicklungsumgebung vorhanden	Integration direkt in die CAD-Umgebung	Modularer Aufbau unabhängig von CAD-Systemrestriktionen
	Einfache Bedienung	Nutzung von Funktionsbausteinen des Zielsystems	Funktionsumfang anwenderspezifisch
	Automatisierung möglich		Einfache Wartung
			Optional erweiterbar
			Systemunabhängig
<i>Nachteile</i>	Hoher Wartungsaufwand	Hoher Implementierungsaufwand	Hoher Implementierungsaufwand
	Limitierte Erweiterungsfähigkeit	Hoher Anpassungsaufwand bei Systemveränderungen	
	Begrenzte Übertragbarkeit bei Systemveränderungen	Schwierige Übertragbarkeit auf andere CAD-Systeme oder Systemversionen	

⁴⁰ Visual Basic (VB) und C-Sharp (C#) sind etablierte objektorientierte Programmiersprachen im .NET-Framework.

Als Referenzsystem wird in dieser Arbeit eine Stand-Alone-Anwendung gewählt. Neben den genannten Vorteilen ist vor allem eine systemunabhängige Verwendung möglich. Darüber hinaus verbessert ein modularer Aufbau auch die notwendige Systemwartung und ermöglicht den Einsatz ergänzender Funktionsbausteine.

4.2 Beschreibung der Systemumgebung

Zur Umsetzung des vorgestellten Konzeptes wird die vorbeschriebene Stand-Alone-Anwendung erstellt, welche kurz als CTINA (CT-Daten in Produktentwicklungs-Anwendungen) bezeichnet wird (Abbildung 4-2). Diese wird mit dem bestehenden CAD-System vernetzt. Methodische Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Programmierschnittstelle mit Zugriff auf CAD-assoziierte Funktionsbausteine. CTINA besteht aus einzelnen Modulen, welche auf Software-Bibliotheken zur Verarbeitung von diskreten dreidimensionalen Daten zurückgreifen, die unter anderem am Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD der TU Dresden entwickelt wurden [131]. Ein weiterer Bestandteil sind auch freie Programmbibliotheken (z.B. AForge.NET) [132].

Der strukturelle Aufbau von CTINA wird in drei Bereiche gegliedert (Abbildung 4-2):

- *Visualisierung*: Um die jeweiligen Repräsentationsformen (Schichtbilder, Oberflächenmodelle oder Volumendaten) einzeln oder auf Basis gemeinsamer Referenzierung zu visualisieren verfügt das Konzept über einen kombinierten 3D-Modell-Viewer.
- *Schnittstellenfunktionen*: Für die Verarbeitung der computertomographischen Daten werden DICOM®- und bilddatenspezifische Datenformate zur Verfügung gestellt, die auf einer gemeinsamen Struktur aufbauen. Über Schnittstellenfunktionen erfolgt eine Anbindung an die entsprechenden Funktionsbausteine der CAD-Umgebung.
- *Geometriebeschreibungen* enthalten analytische Funktionen zur grundlegenden Geometriebeschreibung. Neben Methoden zur Bildung von Objektstrukturen werden damit auch Referenzelemente und ihre gemeinsame Verwaltung funktionell beschrieben.

CTINA verbindet das röntgendiagnostische Verfahren der Computertomographie (CT-Umgebung) mit der CAD-Umgebung. Ihre interaktive Anwendung dient der gezielten Bereitstellung computertomographischer Daten und deren umfassende Objektinformationen. Dabei wird ein bidirektionaler Informationsfluss realisiert, der abhängig von der vorliegenden konstruktiven Aufgabenstellung grundsätzlich sowohl von der CT- als auch der CAD-Umgebung initiiert werden kann.

Die Basis bildet jedoch das CAD-System. Damit werden die jeweils erforderlichen Informationen aus der CT-Umgebung mittels etablierter Skizzierfunktionen anfragt und als adaptive Repräsentationsformen gezielt in die CAD-Umgebung überführt. Somit wird der methodische wie auch technisch etablierte Prozess der mechanischen Bauteilmodellierung durch die vielfältigen Objektinformationen aus computertomographischen Daten erweitert und integriert.

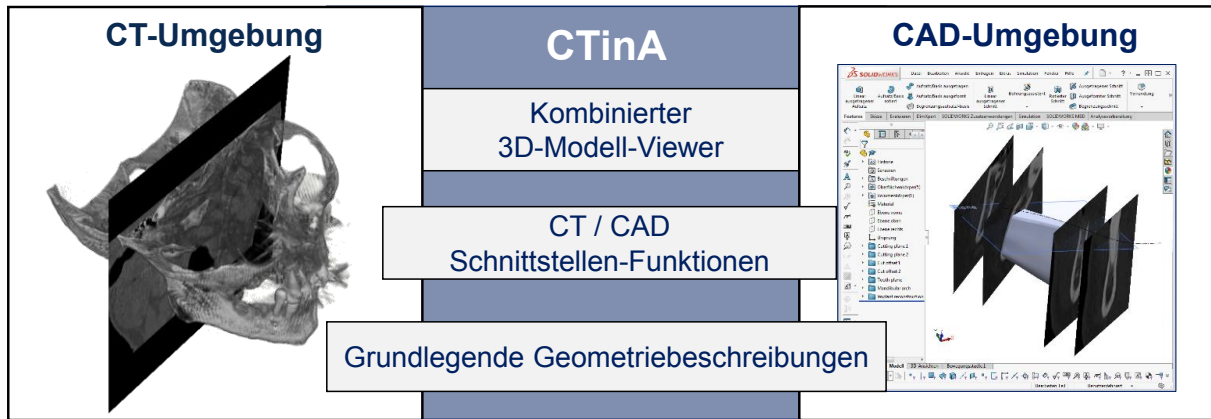


Abbildung 4-2: Programmtechnische Umsetzung der Systemumgebung CTINA

Abbildung 4-3 zeigt den grundsätzlichen Aufbau. Die Bedienoberfläche besteht aus drei Bereichen: der Menüleiste, dem Visualisierungsbereich und dem Projektbaum.

In der Menüleiste sind alle bekannten Methoden der Datenvorbereitung integriert. Sie gewährleisten Präsenz und Konstanz computertomographischer Daten sowie die Erstellung der Referenzen. Die Datenübertragung in die CAD-Umgebung wird ebenfalls über die Menüleiste realisiert. Die jeweiligen Bestandteile der Menüleiste sind in Anlage A.1 aufgeführt. Der Visualisierungsbereich dient der besseren Veranschaulichung aller computertomographischen Informationen. In ihm werden die in den computertomographischen Daten verfügbaren Informationen und externen Referenzen transferiert, gesteuert und visualisiert. Der Projektbaum untergliedert alle Bestandteile des jeweils aktuellen Datensatzes. Er bildet sowohl die lokale Modellstruktur der initialisierten Datenbasis als auch die darauf basierenden Objektinformationen als Visualisierungsformen, Repräsentationsformen und Referenzen einschließlich definierender Merkmale ab.

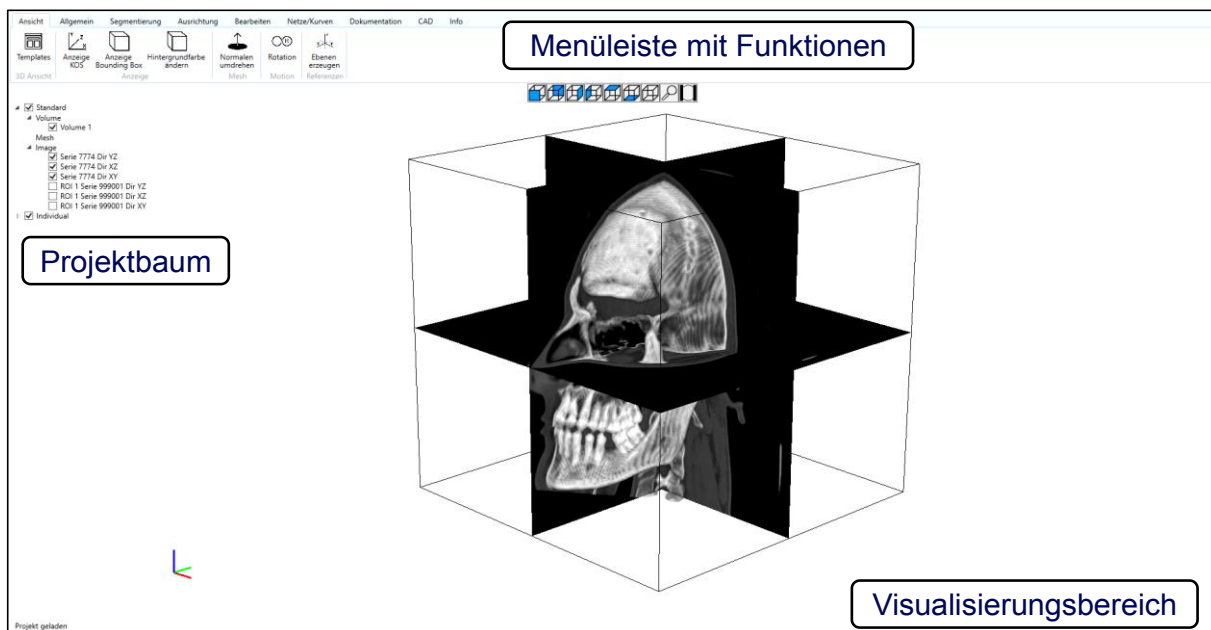


Abbildung 4-3: Aufbau und Bestandteile der Systemumgebung CTINA (Version 1.4.7)

4.3 Neukonstruktion eines individuellen Schädelimplantats

Im vorliegenden Fall soll die individuell angewandte Neukonstruktion eines Knochenimplantats den umschriebenen Defekt eines frontalen menschlichen Schädelbeins ersetzen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die dafür angewandten computer- und bildtechnischen Parameter (Tabelle 4-2):

Tabelle 4-2: Eigenschaften der verwendeten Hard- und Software sowie des vorliegenden Datensatzes

Art des Systems (Hardware / Software)	Eigenschaften / Status
<i>CAD-System</i>	<ul style="list-style-type: none"> • SOLIDWORKS® Version 2020
<i>CTinA</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Version 1.4.7
<i>Verfügbare Hardware</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Intel® Core i7-6700K CPU 4,00 GHz • Installierter Arbeitsspeicher: 16 GB RAM • 64 Bit Betriebssystem: Windows® 10 Pro • Grafikkarte: NVIDIA® GEFORCE® GTX 970, 4 GB DDR5 • 500 GB SSD (System) und HDD (1 TB Datenablage)
<i>Bildtechnische Eigenschaften</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Datenformat: DICOM® • Anzahl der Schichtbilder: 238 • Schichtgröße: 512 x 512 px • Bittiefe: 16 Bit • Pixelgröße: 0,4434 mm • Schichtabstand: 1 mm

4.3.1 Anatomische Grundlagen

Um die Problemstellung und die daraus ableitbaren Kriterien für ein geeignetes Lösungskonzept bewerten zu können, erfolgt zunächst ein Überblick zu den anatomischen Grundlagen. Das menschliche Schädelskelett besitzt eine außerordentlich große individuelle Formenvielfalt. Weder in der äußeren Form noch in der intraossären⁴¹ Struktur gleicht ein Schädel dem anderen. Somit beeinflussen das Alter des Schädels, die genetischen Präformierungen, verschiedene Stoffwechselprozesse und nicht zuletzt die funktionelle Beanspruchung des Kiefers die individuelle Dynamik der Schädelmorphologie [134]. Anatomisch besteht das menschliche Schädelskelett aus einem Hirnschädel, auch Schädelkalotte genannt und einem Gesichtschädel, dem knöchernen und konturgebenden Anteil des Gesichts (Abbildung 4-4:). Der Schädelknochen besteht aus mehreren übereinanderliegenden Schichten:

- Äußere Schicht (Lamina externa)
- Poröse Schicht (Diploe)
- Innere Schicht (Lamina interna)

⁴¹ Ossär ist ein medizinischer Fachbegriff der für knöchern oder die Knochen betreffend steht.

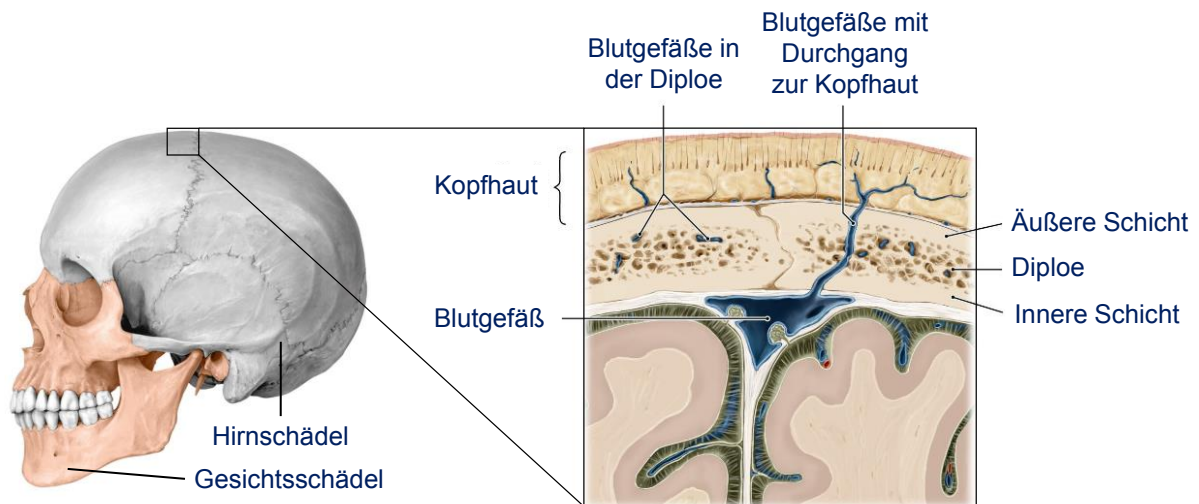


Abbildung 4-4: Aufbau des Hirnschädels - Querschnitt mit anliegenden Geweben und Gefäßen [133, 134]

Durch den gesamten Hirnschädel ziehen kleine Blutgefäße, welche die angrenzende Kopfhaut mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgen [133]. Die Schädelstärke beträgt durchschnittlich etwa 6 mm und ist vom vorderen zum hinteren Bereich des Schädels kontinuierlich auf etwa 3 mm abnehmend.

4.3.2 Problemstellung und Analyse

Das vorliegende Beispiel in Abbildung 4-5 zeigt einen umschriebenen Schädeldefekt im Bereich des linksseitigen Stirnbeins infolge einer traumatischen Knochenläsion. Die provisorische Defektdeckung erfolgt mit einem Knochenersatzmaterial. Art, Ausdehnung und Schwere einer knöchernen Schädelverletzung können durch diverse Schädigungsmuster sehr variabel sein. [134]

Für die plastische Rekonstruktion des vorliegenden Patientenfalls existieren keine allgemeingültigen Standards. Folglich wird der Defekt plastisch-rekonstruktiv durch eine individuell angepasste Hybridkonstruktion ausgeglichen. Diese Variante resultiert aus Untersuchungen zu unterschiedlichen Schädelimplantaten, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. [133, 135, 136]

Grundsätzlich kann bei kleineren ossären Defekten oft eine Deckung mit patienteneigener Knochenstruktur ausreichen. Hingegen erfordern ausgedehnte Traumata aufgrund der notwendigen Fusion geometrischer und funktioneller Eigenschaften eine individuell angepasste rekonstruktive Lösung. Die Behandlung von lokalen Begleitverletzung muss dabei auch strategisch berücksichtigt werden.

Grundlage der Hybridkonstruktion ist eine präzise computertomographische Erfassung des traumatisch lädierten Areal. Aus den Ergebnisdaten werden anhand der entwickelten Prozesskette alle notwendigen Informationen und geometrischen Bezüge generiert.

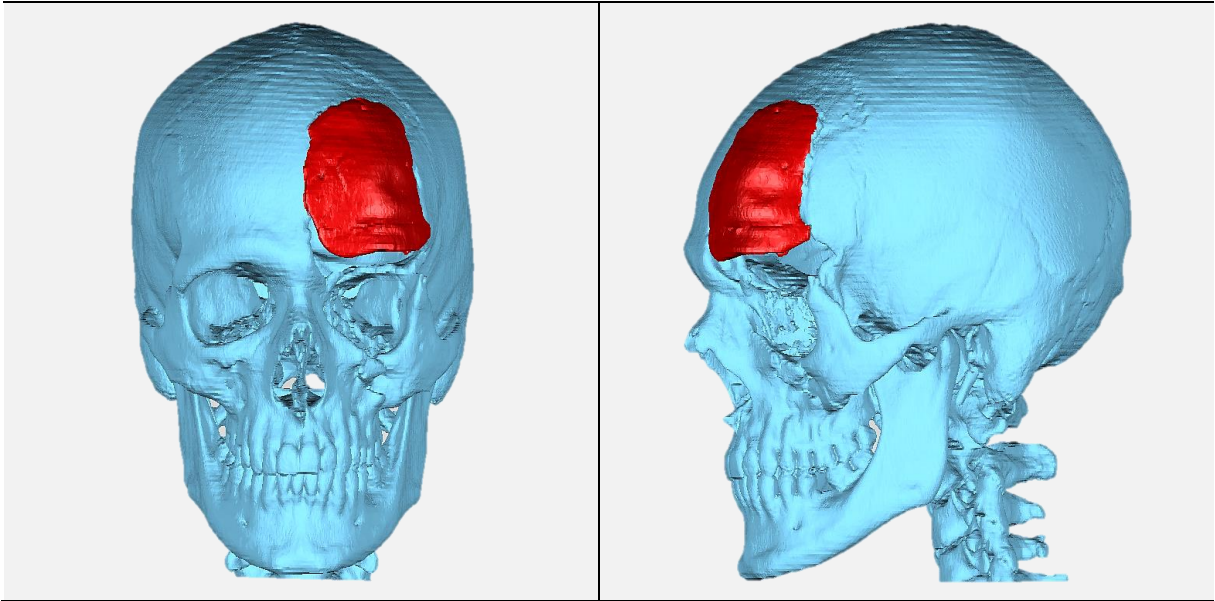


Abbildung 4-5: Verschiedene Ansichten eines Polygonmodells des Patienten-Datensatzes mit Kennzeichnung der provisorischen Defektdeckung

Dazu wird der Modellierungsprozess in zwei Teile untergliedert. Zunächst erfolgen die Analyse und die Erfassung des Defektbereiches. Dabei wird ein Vorgehen konzipiert, um die notwendigen Referenzen, wie etwa die Schädelkrümmung und angrenzende Bereiche zu ermitteln. In der aktuellen Literatur finden sich dafür verschiedene Strategien, die in Anlage A.2 verzeichnet sind. Für die vorliegende Problemstellung wird eine Methode favorisiert, bei der am unverletzten Teil des Schädels variable Schnittebenen erzeugt werden. Diese sind als Grundlage der Modellierung anzusehen. Ebenso werden individuelle Referenzen genutzt, die Rand- und Übergangsbereiche charakterisieren und das Knochengewebe am Defektbereich spiegelbildlich projizieren [133, 136]. Das Ziel dieses ersten Prozessschrittes ist die Erstellung eines Implantat-Rohlings als provisorischer Formschluss des Defektbereiches.

Anschließend erfolgt die Gestaltung des individuellen Hybridimplantats. Dabei müssen neben allgemeinen Anforderungen an die Produktentwicklung nach VDI 2221 auch medizinische und regulatorische Anforderungen beachtet werden [16, 95, 137, 138]. Letztere sind in der Medizin durch entsprechende Leitlinien geregelt. Jedes Produkt muss über diverse Zulassungsverfahren verifiziert werden, bevor es am lebenden Patienten eingesetzt werden darf. Eine detaillierte Aufstellung der allgemeinen Anforderungen an Schädel- und Hybridimplantate zeigen begleitende Studien, die am Lehrstuhl Konstruktionstechnik / CAD der TU Dresden durchgeführt wurden [133, 135, 136]. Diese Liste ist in Anlage A.3 aufgeführt. Unter Berücksichtigung der Anlage entsteht so eine individuelle Implantatgeometrie, die alle notwendigen funktionellen Anforderungen erfüllt.

4.3.3 Modellierung

Bei der Erstellung des Implantat-Rohlings werden im genannten Fall der Datensatz und das erfasste digitale Modell zunächst in der CT-Umgebung vorbereitet, um es später als Grundlage für die individuelle Konstruktion in die CAD-Umgebung zu überführen.

Import und initiale Ausrichtung des Datensatzes (CTinA)

Nach Auswahl und Import der Schichtbildsequenz erfolgt die initiale Ausrichtung. Das diskrete Volumenmodell orientiert sich dabei an der Objektgeometrie. In jeder Perspektive erfolgt die Ausrichtung durch Rotation und Translation sowie durch Eingrenzung des Datensatzes auf den interessierenden Bereich. Anschließend wird auf Grundlage dieser Transformationsparameter die neue Schichtbildsequenz visualisiert (Abbildung 4-6).

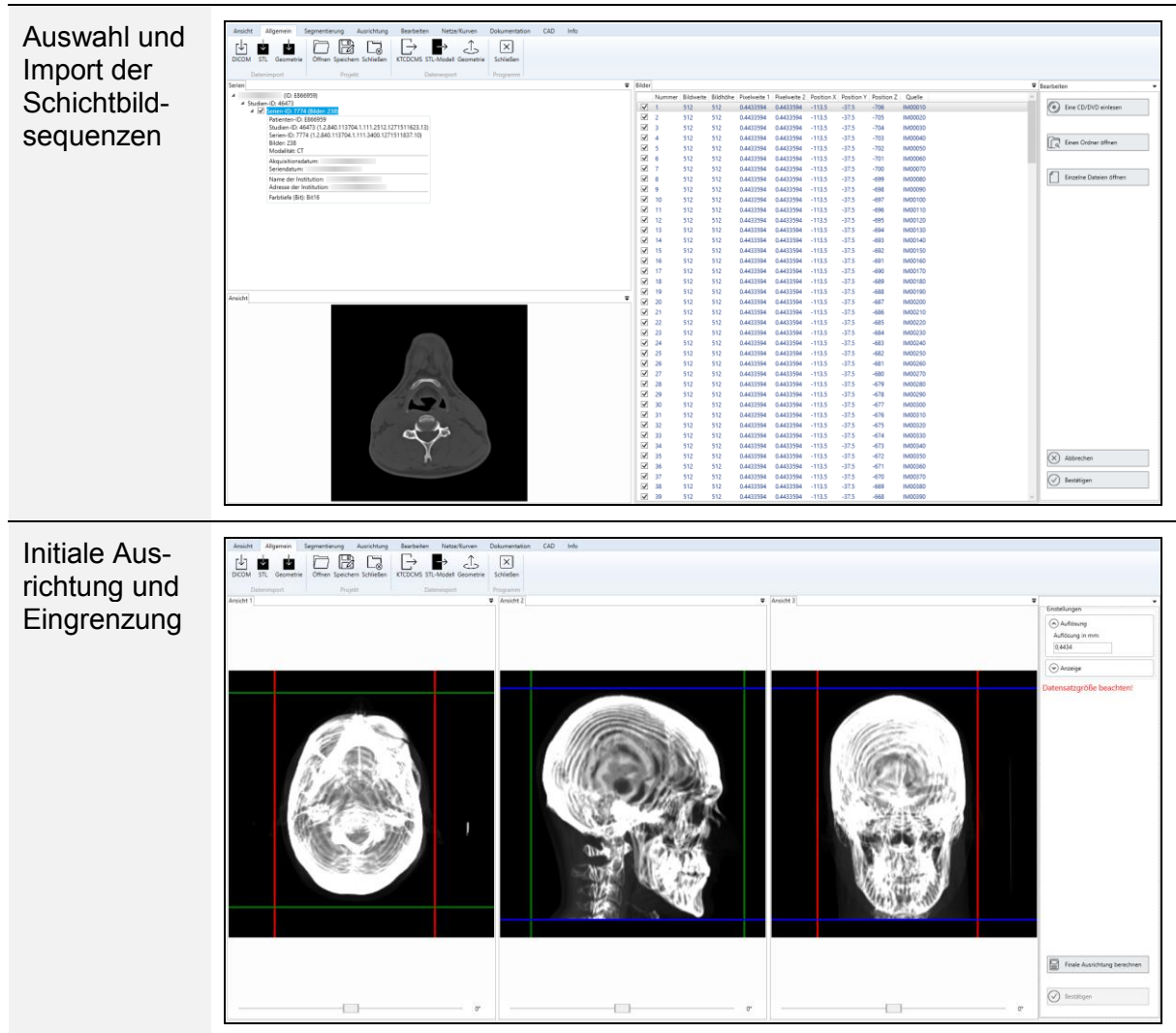


Abbildung 4-6: Import und initiale Ausrichtung sowie Eingrenzung auf den Schädelbereich

Erstellen von Referenzen (CTinA)

Die Sagittalebene ist im Idealfall als Symmetrieebene anzusehen (Abbildung 3-23). Der menschliche Schädel ist jedoch biodivers und bezüglich seiner Struktur nicht exakt symmetrisch. Auch befindet sich die Schädelsagittale aufgrund variierender Rahmenbedingungen (Abschnitt 3.1.1) nicht genau in der Mitte des Bildstapelkoordinatensystems. Deshalb erfolgt zunächst die Erstellung einer Referenzebene. Diese und die spätere Symmetrieebene werden als Schnittebene möglichst zentral im Modell erstellt. Dazu werden drei Punkte definiert: die Mitte des Unterkieferknochens, der zentrierte Punkt zwischen den Augenhöhlen und der höchste mediane Punkt der Schädelkalotte.

Die Referenzebene wird in CTINA als beliebiges Schnittbild realisiert (Abbildung 4-7, oben).

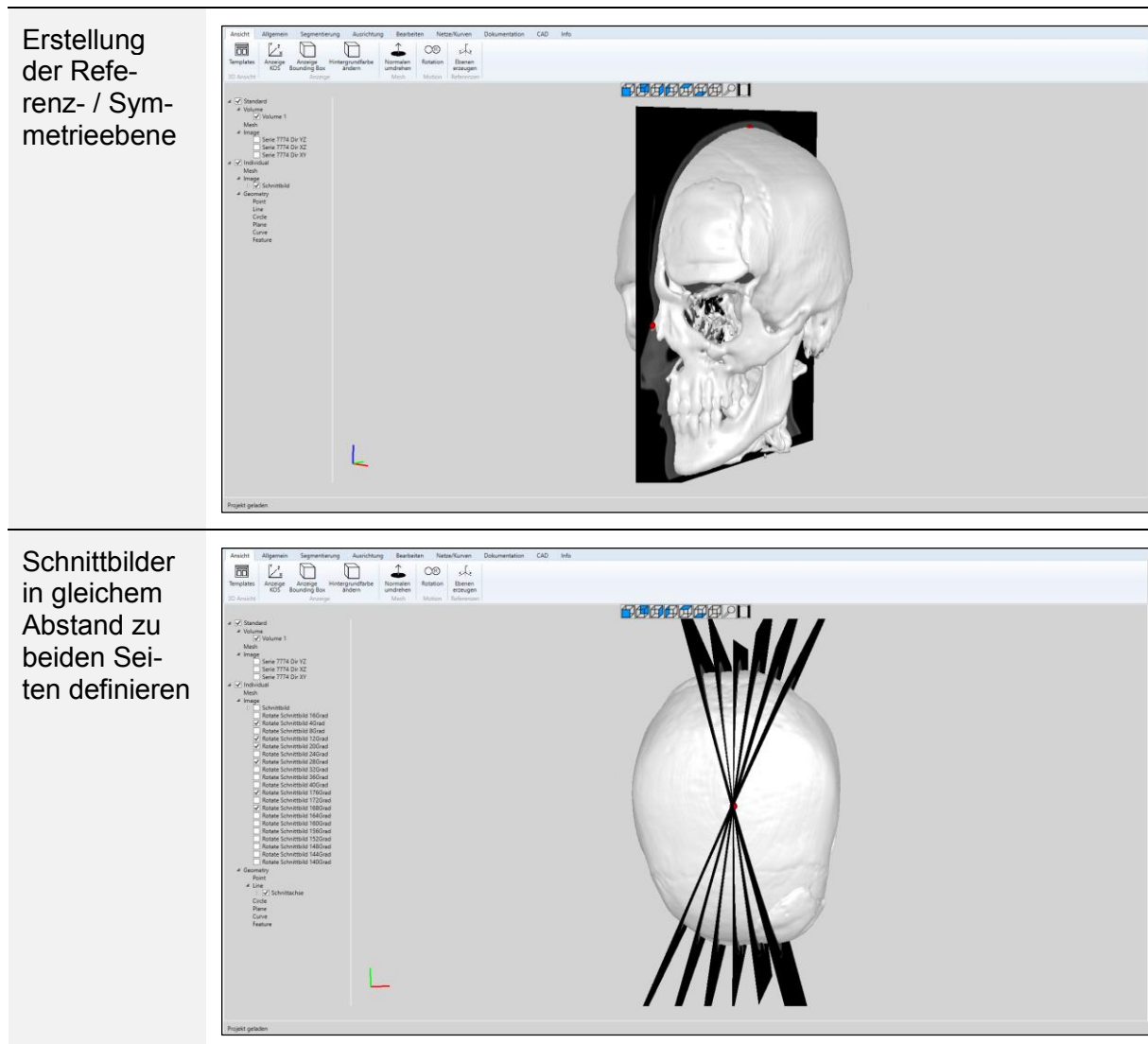


Abbildung 4-7: Erstellung von Referenzen in Form beliebiger Schnittbilder

Bezogen auf diese Ebene werden zusätzliche symmetrische Schnittbilder um den Defektbereich und über die unversehrte Seite des Kopfes formiert. Die Referenzebene wird nun dafür genutzt, eine zentrale Rotationsachse festzulegen. Nachfolgend werden zusätzliche beliebige Schnittbilder erzeugt. Diese sind um jeweils weitere definierte Winkel versetzt (Abbildung 4-7, unten). Die Winkelvariation kann dabei manuell oder über vordefinierte Muster gewählt werden.

Überführung an die CAD-Umgebung SOLIDWORKS®

Um die erstellten Referenzen zielführend für die Konstruktion zu nutzen, erfolgt die Übergabe an die CAD-Umgebung (Abbildung 4-8). Neben der eigentlichen Bilddatei des jeweiligen Schnittbildes werden auch die mit ihr assoziierten Dimensionen, ihre Position und ihre Orientierung übergeben. Dies erfolgt auf der initialisierten Datenbasis. Jede Schnittbilddarstellung erhält in der CAD-Umgebung einen separaten Ordner, in dem neben ihren Eigenschaften ihre Referenzebene mit den entsprechenden Transformationsparametern aus der CT-Umgebung

abgebildet sind. Die Referenzebenen werden angewandt, um den weiteren Konstruktionsprozess zu ermöglichen. Dazu werden ausschließlich die Schnittbilder verwendet, welche aktuell in Bearbeitung sind.

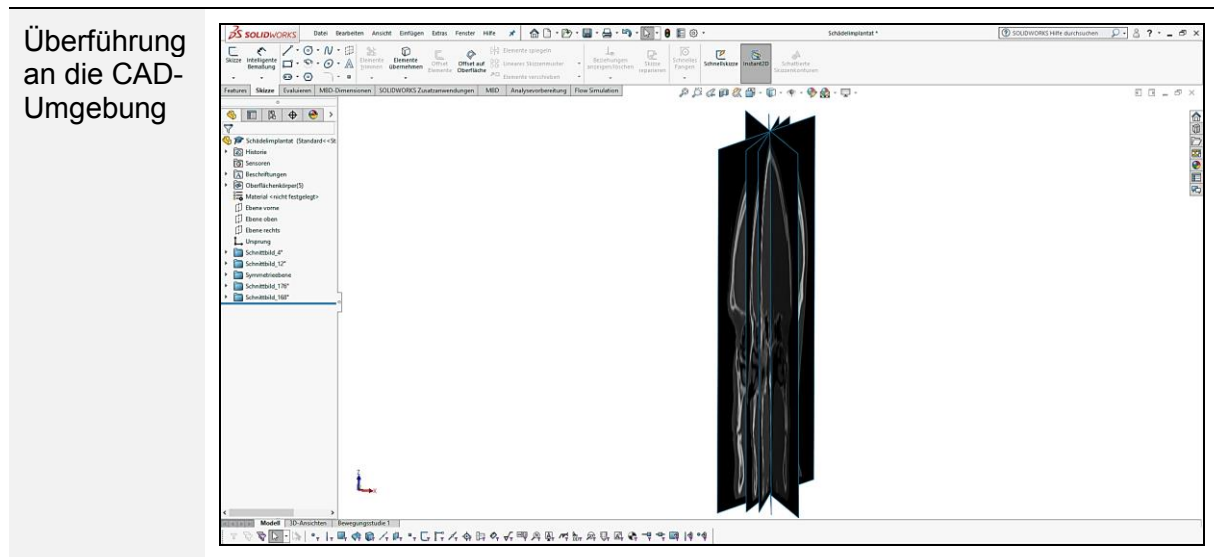


Abbildung 4-8: Auswahl und Übergabe der Schnittbild-Repräsentationen an die CAD-Umgebung

Modellierung der Schädelkontur auf Basis der unversehrten Seite

Zur Implantaterstellung wird ein Schnittbild aus dem äquivalenten Bereich der unversehrten Schädelseite ausgewählt. Im genannten Fall erfolgt auf der Referenzebene des Schnittbildes die Konturableitung, automatisiert (Abschnitt 3.5.4) oder manuell mittels Skizzierfunktionen. Auch eventuelle Korrekturen sind auf diese Weise möglich (Abbildung 4-9). Anschließend werden die so entstandenen Knochensilhouetten über die Symmetrieebene gespiegelt und auf das äquivalente Schnittbild der Defektseite übertragen (Abbildung 4-10).

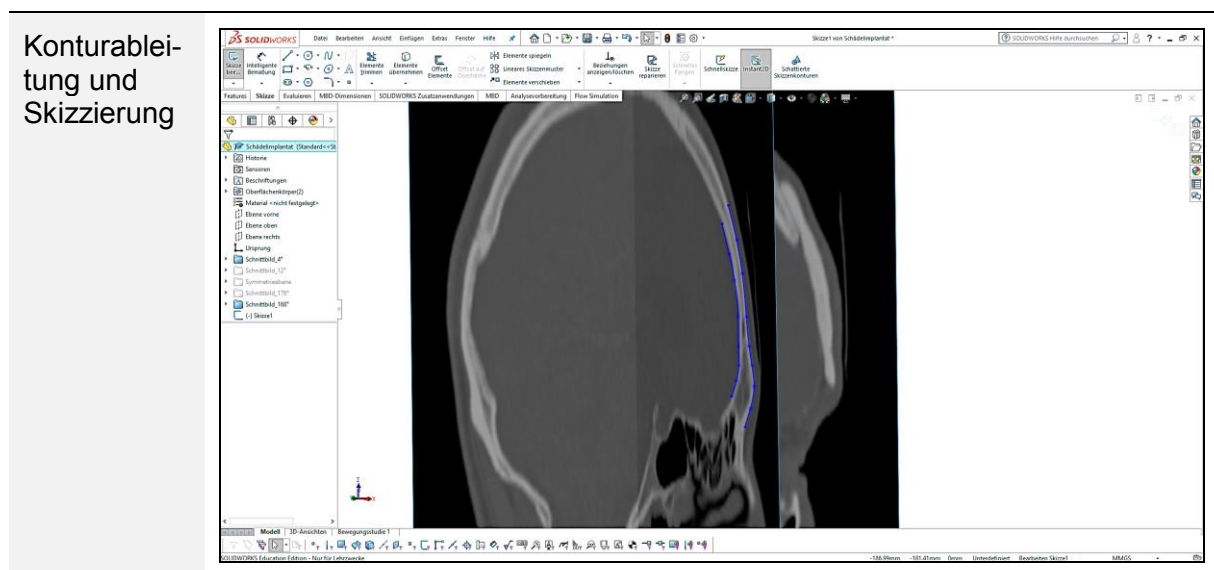


Abbildung 4-9: Konturableitung des korrespondierenden Defektbereiches der unversehrten Seite

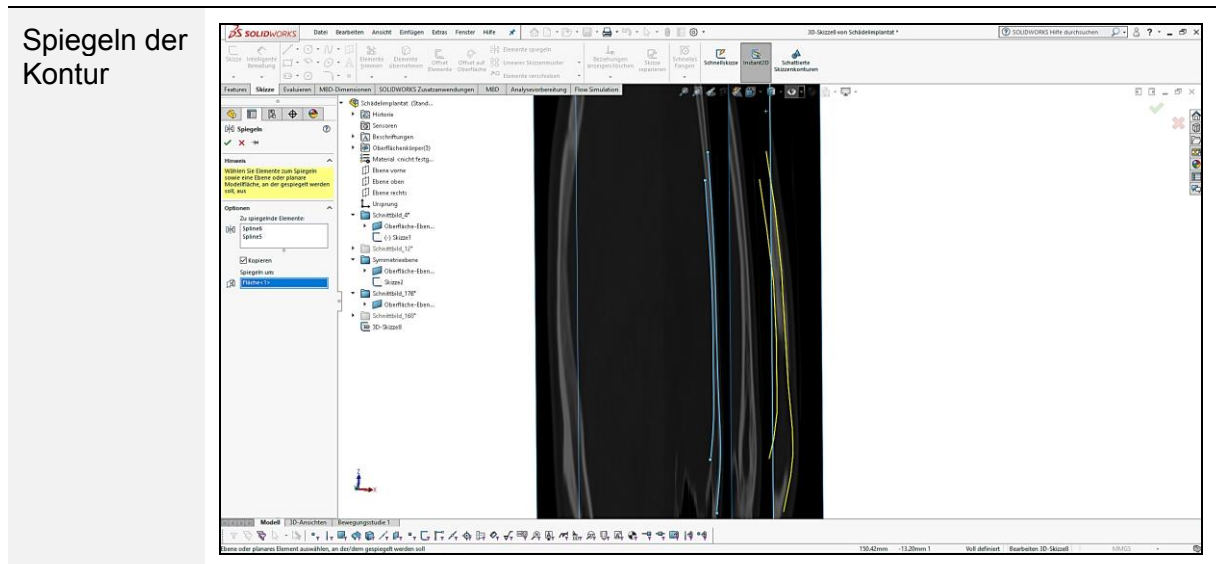


Abbildung 4-10: Übertragung der Kontursilhouette auf das äquivalente Schnittbild des Defektbereiches

Nach Skizzierung der Defektkonturen erfolgt die Verbindung der Umriss mit Hilfe von Leitkurven. Unter Verwendung der Scheitelpunkte jeder Silhouette wird eine bessere Interpolation zwischen den einzelnen Konturen erreicht. Zudem erfolgen die Erstellung und Überführung weiterer Referenzkonturen, wie etwa des Augenhöhlenbereiches. Diese werden mit den Defektkonturen verschnitten, um einen formschlüssigen Übergang zwischen Knochen und Implantat zu gewährleisten. Anschließend wird die entsprechende Geometrie dreidimensional erzeugt. Abbildung 4-11 zeigt den Implant-Rohling als dreidimensionales Volumenmodell aus verschiedenen Ansichten.

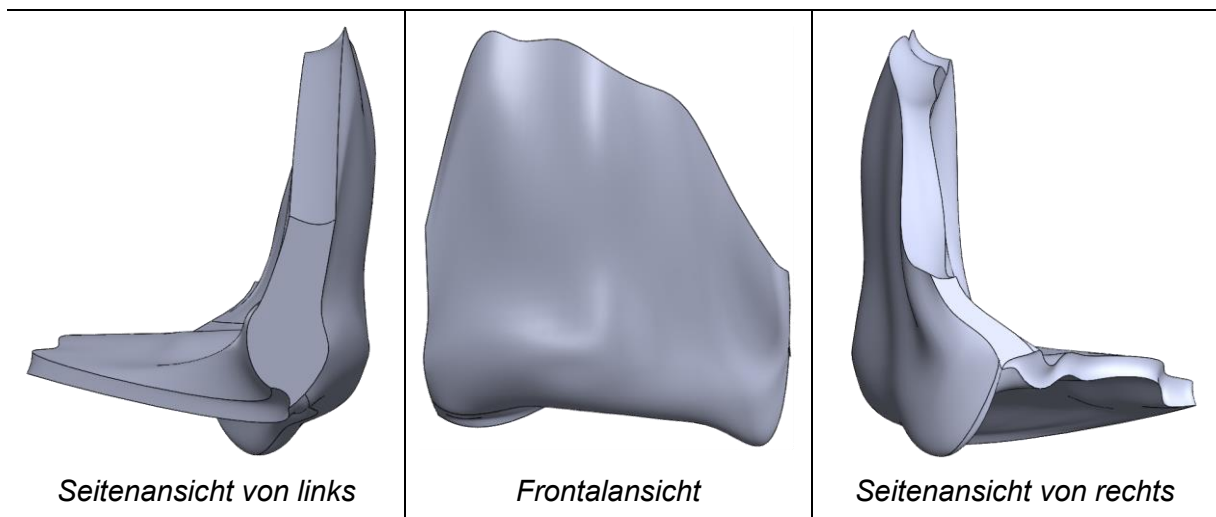


Abbildung 4-11: Verschiedene Ansichten des dreidimensionalen Implantat-Rohlings (Nach [133])

Das Ergebnis ist zunächst eine gespiegelte Ausführung der Schädelknochenstruktur. Abbildung 4-12 zeigt das provisorische Implantatmodell an einer Oberflächenrepräsentation in der CT-Umgebung. Anhand einer visuellen Prüfung wird die Passform des Implantats grob abgeschätzt. Bei Bedarf sind strukturelle Nachbesserungen möglich.

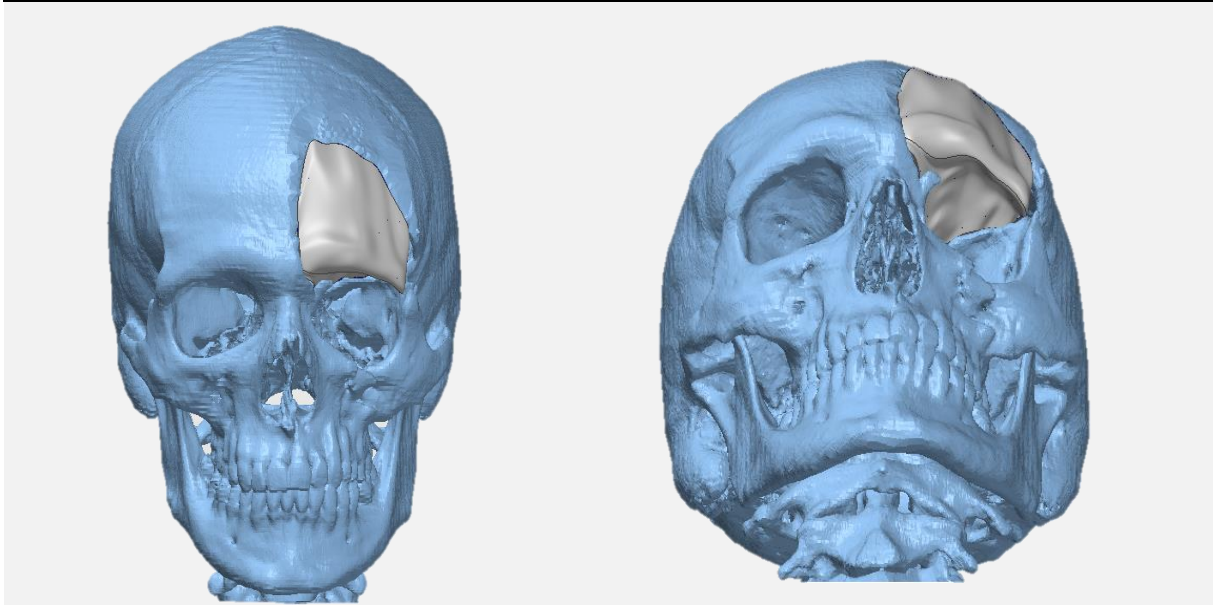


Abbildung 4-12: Verschiedene Frontalansichten des provisorischen Schädelknochenimplantats

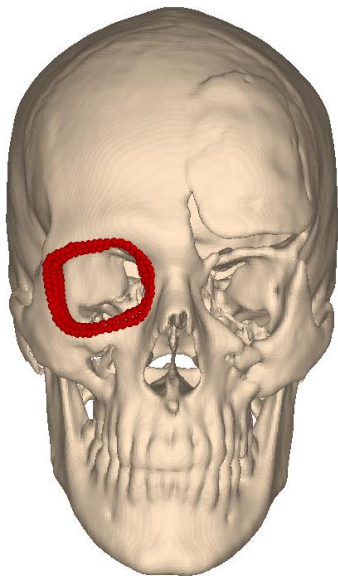
Konstruktion des individuellen Hybridimplantats

Nach Formschluss des Defektbereiches erfolgt die Konstruktion des individuellen Hybridimplantats. Der Aufbau erfolgt zweistufig, einerseits über eine fixierende Grundstruktur, andererseits über eine biokompatible Füllstruktur. Hauptaufgabe einer materiell soliden und chemisch inerten Grundstruktur ist die feste Integration des Implantats an den lädierten Bereich. Dennoch sollte sie intraoperativ variable Anpassungen gestatten, darüber hinaus auch sterilisierbar und röntgenopak sein. Die Füllstruktur sollte nahezu identische funktionelle Eigenschaften aufweisen, sowie aus einem biokompatiblen Material bestehen. Rein konstruktiv wird dafür eine Netzstruktur favorisiert, die eine stabile ossäre Integration und eine suffiziente Gefäßversorgung gewährleistet. [133, 135, 136]

Ein weiteres wichtiges Merkmal der Implantatgestaltung ist die Art der Befestigung. Diese wird über Verschraubungen, Einpressungen oder Klebeverbindungen realisiert und muss medizinisch sowohl funktionellen als auch ästhetische Anforderungen genügen [133]. In Bezug auf den Einsatz in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (MKG) wird im vorliegenden Fall eine eingelassene Verschraubung verwendet. Über die formschlüssige Grundstruktur erfolgt die Befestigung am Schädelknochen. Neben den funktionell-technischen Aspekten ist das Ziel, die Vermeidung optisch-ästhetischer oder haptischer Nachteile für den Patienten. [133, 135, 136]

In Abbildung 4-13 sind ausgewählte Abläufe der prozessualen Interaktion während der Hybridimplantat-Modellierung abgebildet.

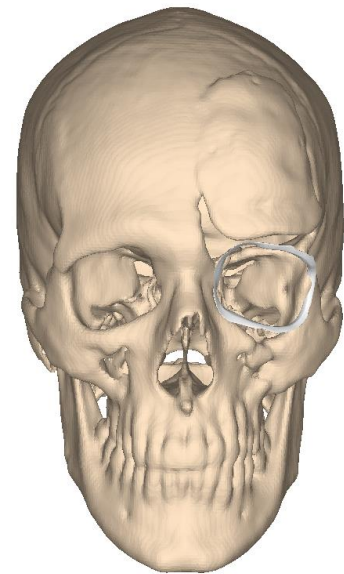
Erstellung diverser Referenzelemente zur Rekonstruktion der Augenhöhle



Definition der Augenhöhle an der unversehrten Seite in der CT-Umgebung



Spiegeln und Modellierung eines Flächenmodells in der CAD-Umgebung

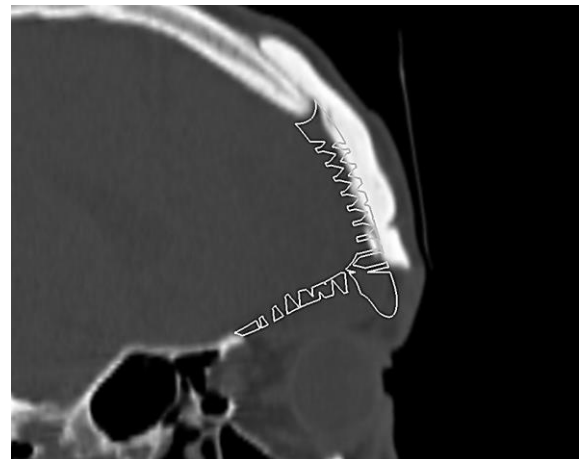


Bidirektionale Übertragung in die CT-Umgebung

Modellierung und Validierung anhand der originalen CT-Daten



Kombinierte Visualisierung - rotierende Schnittbildvariation zur Validierung der Passgenauigkeit (CT-Umgebung)



Einzelne Schnittbildansicht des Defektbereiches - Anbindung an den Knochen kann überprüft und optional angepasst werden (CAD-Umgebung)

Abbildung 4-13: Ausgewählte Schritte der Modellierung [133, 135, 136, 137]

In Abbildung 4-14 ist das Ergebnis der Modellierung, das individuelle Hybridimplantat aus unterschiedlichen Ansichten abgebildet. Dabei erfolgte neben der anforderungskonformen Gestaltung die zusätzliche Ableitung individueller Referenzen, wie etwa des lädierten Defektrandbereiches. Dieser Schritt führte zu einer Präzisierung der Anbindung zwischen Knochengewebe und Implantatstruktur. Folglich kann eine Verbesserung der Passgenauigkeit bei der Implantatmontage gewährleistet werden.

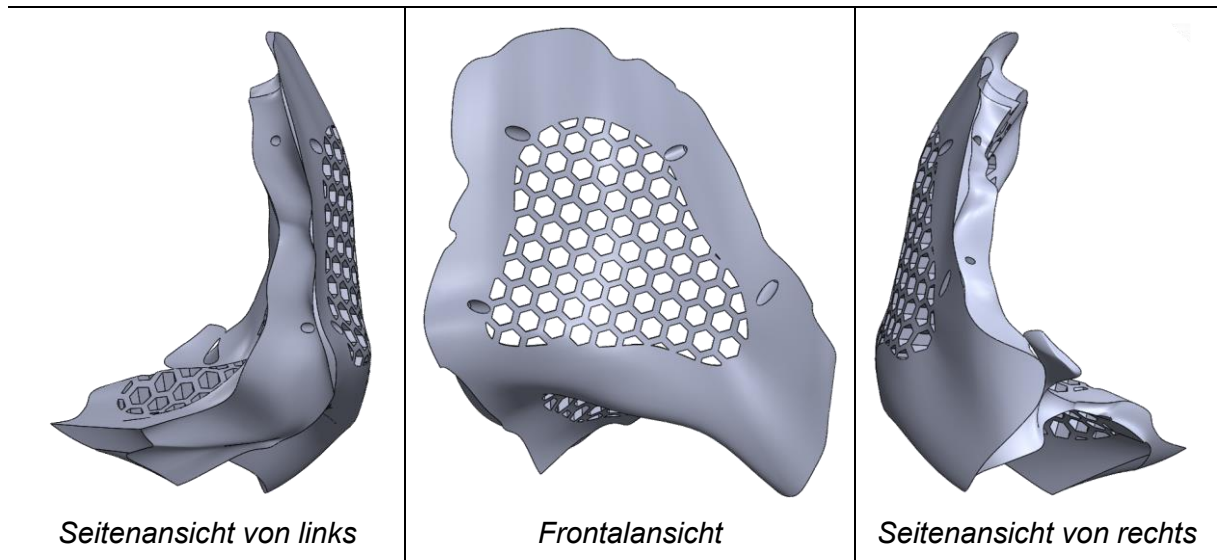


Abbildung 4-14: Unterschiedliche Ansichten des individuellen Hybridimplantates (Nach [133])

Das Hybridimplantat besteht aus einer Grundstruktur zur formschlüssigen Defektabdichtung, welche aus metallischen und nichtmetallischen Materialien, wie etwa REINTITAN oder PEEK⁴² hergestellt wird. Sie realisiert die notwendige mechanische Kopplung zwischen Knochen und entsprechendem Defektbereich. Die Grundstruktur wird über eine wabenförmige resorptive Füllstruktur aus CALCIUMPHOSPHAT ergänzt. Sie garantiert eine suffiziente Biointegration der arteriellen Blutgefäße, der Nerven und des Bindegewebes. Heutzutage werden zumeist kreisförmig oder sechseckig angeordnete Waben in jeweils offener oder geschlossener Form angewandt. [133, 135, 136]

Die Anschraubbereiche zur Befestigung werden im Allgemeinen unter den Haaransatz implantiert. Alle Verschraubungen werden über eine integrierte Befestigung realisiert. Dabei wird durch den vorgegebenen Schaft eine Bohrschablone zur kontrollierten Führung eingebettet. Dieser Schaft ist in einem Winkel von etwa 30° bis 45° zum vorhandenen Schädelknochen positioniert, so dass ein stabiler Anschluss sichergestellt wird. [133, 135, 136]

Innerhalb einer gesunden Augenhöhle (Orbita) verlaufen anatomisch eine Vielzahl kleinster Blutgefäße und Nerven. Zu ihrem Verlauf liegen jedoch im vorliegenden Fall aufgrund der kausalen Traumata keine weiterführenden computertomographischen Informationen vor. Grundsätzlich sind keine funktionell substituierenden Rekonstruktionen möglich, so dass eine

⁴² PEEK - Polyetheretherketon: thermoplastischer Kunststoff

Augenepithese oder ein Glasaugelimplantat werden könnten. Technologisch ist somit lediglich ein randbildender Formschluss avisiert (Abbildung 4-12 und Abbildung 4-14). Durch die spezielle Systematik des CAD-Systems und die parametrische Implantatstruktur kann dies gegebenenfalls nachträglich angepasst werden. Darüber hinaus sind auch zusätzliche supportive Maßnahmen im individuellen Einzelfall möglich. So können beispielsweise Spülkanäle und Drainagen eingebracht werden, um bei Bedarf lokal wirksame Medikamente zu applizieren.

Zur Validierung dieser Prozesskette erfolgten mehrere medizinische Studien mit weiterführenden Informationen. Dabei sind neben detaillierten Modellierungsabfolgen auch noch andere Formen der konstruktiven Umsetzung integriert. Zudem enthalten die Arbeiten umfangreiche Ausführungen zu notwendigen Anforderungen an die fertigungsgerechte Konstruktion. So werden beispielsweise individuelle Druckschablonen zur Implantation betrachtet. Ebenso wird auf die industrielle Herstellung und auf die Validierung der Ergebnisgüte eingegangen. [133, 135–137]

Der in dieser Arbeit dargestellte Modellierungsprozess orientiert sich vorrangig an der Nutzung der entwickelten Prozesskette und an einem konkreten Anwendungsbeispiel. In der Praxis sind für die funktionelle Sicherung gleichartiger Konstruktionen zahlreiche Ausgangsinformationen, vielfältige medizinische Daten und oft auch iterative interdisziplinäre Rücksprachen notwendig [18]. Konstruktiv gehören dazu auch wesentliche Simulationsuntersuchungen um die festgelegten Anforderungen abzusichern.

4.4 Anpassungskonstruktion des Räderwerkes einer historischen Taschenuhr

Ein Beispiel aus der Museologie zeigt die Anpassungskonstruktion einer historischen Taschenuhr, dem Chronometer Nr. 8 von J.H. Seyffert. Zur Verdeutlichung der mechanischen Zusammenhänge soll das Räderwerk der Uhr rekonstruiert und auf einem bereits vorliegenden digitalen Modell entsprechend angepasst werden. Die Taschenuhr ist während der Luftangriffe am 13. Februar 1945 auf Dresden durch ein Feuer stark beschädigt worden, Abbildung 4-15 zeigt den aktuellen Zustand der Vorder- und Rückseite. Das Gehäuse der Uhr ist nicht mehr vorhanden. [139–141]



Abbildung 4-15: Taschenuhr Chronometer Nr. 8 - Vorderseite (links), Rückseite offen (rechts) [89, 142]

Um für eine Anpassungs- und Änderungskonstruktion funktionelle Zusammenhänge im Uhrwerk analysieren zu können, wäre ihre fachgerechte Demontage erforderlich. Weil jedoch die innere Struktur und der Zerstörungsgrad schwer einschätzbar sind, müssen alternative Möglichkeiten zur Analyse verwendet werden. Die Uhr wurde somit durch einem industriellen Computertomographen digitalisiert [89]. In Tabelle 4-3 sind die Eigenschaften des vorliegenden Datensatzes und die technischen Voraussetzungen der verwendeten Software aufgelistet. Die Hardware ist äquivalent zu den in Tabelle 4-2 genannten Voraussetzungen.

Tabelle 4-3: Technische Voraussetzungen der verwendeten Software bei der Taschenuhr [142]

Art des Systems (Software)	Eigenschaften / Status
CAD-System	<ul style="list-style-type: none"> AUTODESK® INVENTOR® Professional 2020
CTinA	<ul style="list-style-type: none"> Version 1.4.7
Bildtechnische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Datenformat: TIFF Anzahl der Schichtbilder: 397 Schichtgröße: 800 x 873 px Bittiefe: 16 Bit Pixelgröße: 0,0693 mm Schichtabstand: 0,0693 mm

4.4.1 Technische Grundlagen

Uhrenwerke setzen sich aus diversen mechanischen Komponenten zusammen [143]. Beim Chronometer Nr. 8 können diese in folgende vier Hauptbaugruppen eingeteilt werden:

- Antrieb / Energiespeicher als Zugfeder
- Räderwerk als Übersetzung
- Anker-Hemmung mit Schwingsystem
- Anzeige

Zur Verdeutlichung der funktionellen Zusammenhänge sind in Abbildung 4-16 das Räderwerk mit dem Antrieb abgebildet. Das Federhaus dient als Energiespeicher und Kraftquelle der Uhr. Wird die Uhr aufgezogen, spannt sich die darin befindliche Zugfeder. Die Schnecke ist über eine in der Abbildung nicht dargestellte Kette mit dem Federhaus verbunden und über ein Schneckenrad an den Minutenradtrieb des Räderwerkes gekoppelt. Sie dient einer möglichst gleichmäßigen Übertragung der Kraft. „Das Räderwerk stellt die Übersetzung vom langsam drehenden Federhaus zum schneller drehenden Gangrad dar“ [89]. Es besteht aus Zahnrädern unterschiedlicher Anzahl und Größe. Alle Räder sind dabei eine sogenannte Rad-Trieb-Kombination. Das Schneckenrad greift in den Minutenrad-Trieb, auf dem sich der Minutenzeiger befindet und dies in einer Stunde genau einmal dreht. Die Stundenanzeige wird vom Minutenrad auf ein Wechselrad übersetzt. „Das Minutenrad greift nun in den Trieb des Kleinbodenrades“ [89]. Dieses sogenannte Zwischenrad übermittelt die Rotation in den Sekundenrad-Trieb, das den Sekundenzeiger trägt und eine Umdrehung pro Minute vollzieht. Das Sekundenrad greift schließlich in den Trieb des Gangrades, dem ersten Element der Anker-Hemmung (nicht dargestellt). Die Anker-Hemmung hält das Räderwerk periodisch an. [89, 143]

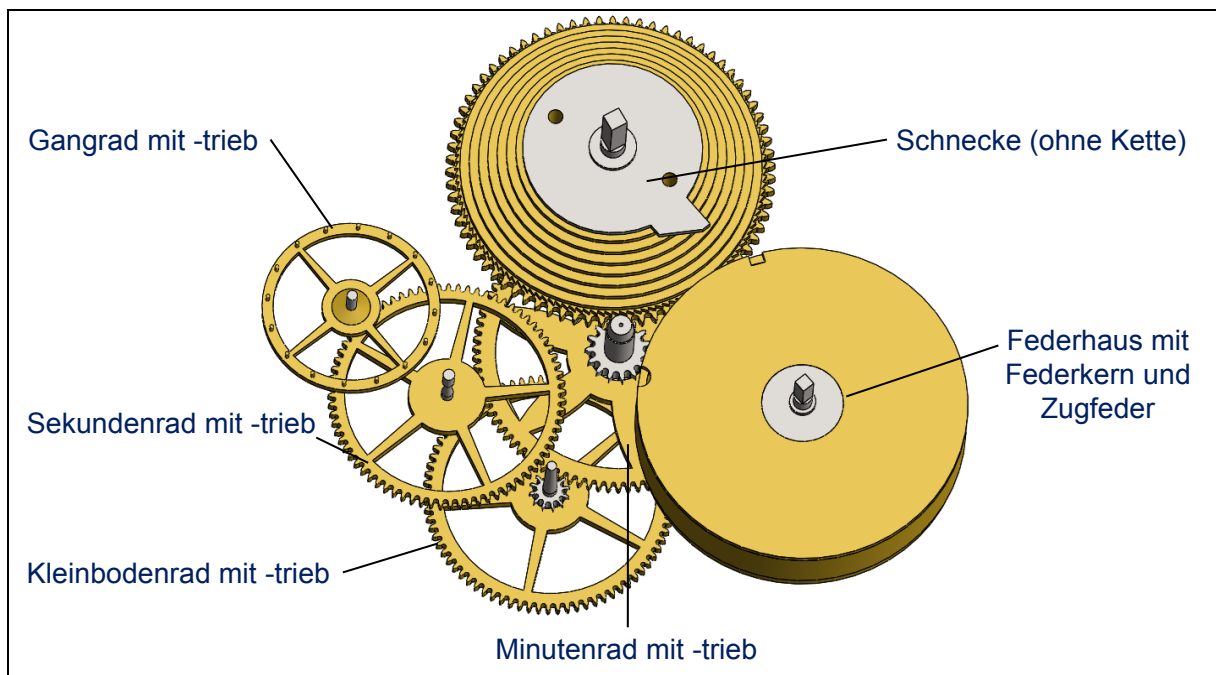


Abbildung 4-16: Räderwerk des Chronometers Nr. 8 mit zusätzlicher Abbildung des Energiespeichers und der Schnecke (Nach [89, 143])

4.4.2 Problemstellung und Analyse

In Abschnitt 2.3 erfolgten anhand dieses Beispiels eine Analyse und eine Validierung zum Stand der Technik. Aktuelle prozessuale Defizite wurden so mit Beispielen unterlegt.

Die technische Herausforderung besteht darin, dass bei dem vorliegenden Soll-Datensatz das Kleinbodenrad und das Minutenrad sowie deren jeweilige Triebe fehlen. Zudem sind alle übrigen Bauteile auf Vollständigkeit und Maßhaltigkeit zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Abbildung 4-16 zeigt das vollständige Modell. Darin sind, wie bereits bei der Funktionsweise erläutert, auch die Schnecken-Baugruppe und das Federhaus mit Federkern und Zugfeder abgebildet.

Die nachfolgende Analyse beschränkt sich auf eine Betrachtung des vorliegenden Datensatzes. Aufgrund des Alters der Uhr liegen jedoch keine zusätzlichen Informationen zum Objekt vor. Einzelne Details sind aus allgemeinen zeitgeschichtlichen Dokumentationen sowie aus aktuellen Studien und Publikationen ableitbar [89, 141, 143].

Abbildung 4-17 zeigt die digitalisierte Uhr als dreidimensionale Volumenvisualisierung und als einzelne zweidimensionale Schichtbildsequenz. Bei der Volumenvisualisierung sind die eng zusammenliegenden und funktionell miteinander verbundenen Einzelteile mit ihren divergenten Dichtekoeffizienten dargestellt. Die exemplarische Schichtbildsequenz im rechten Teil der Abbildung verdeutlicht zunächst nahezu ideale Aufnahmebedingungen, wobei die Uhr in Position und Orientierung mit dem Bildstapelkoordinatensystem korrespondiert. In einer der Platinen, die eine flächige Zwischenschicht zur Befestigung der Einzelteile bilden, sind jedoch kleinere Artefakte einer Strahlaufhärtung visualisiert. Diese sind funktionell bedeutungslos und somit insgesamt als nicht signifikant anzusehen. Diverse Einzelteile sind mit ihren Übergangsbereichen visuell abgrenzbar. Daraus resultiert primär ein guter Kontrast und ein nahezu ausgeglichenes Signal-Rausch-Verhältnis. Auch andere Details, wie etwa die Zähne und Stege der Zahnräder sind optisch gut aufgelöst. Zusammenfassend zeigt sich ein technisches System, in dem viele kleine Einzelteile auf sehr engen Raum funktionell interagieren.

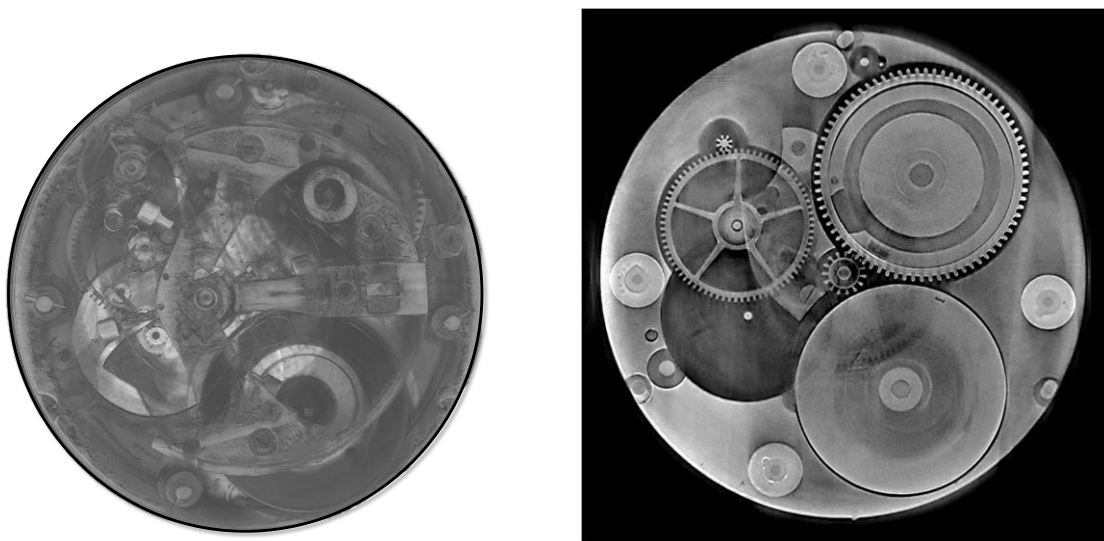
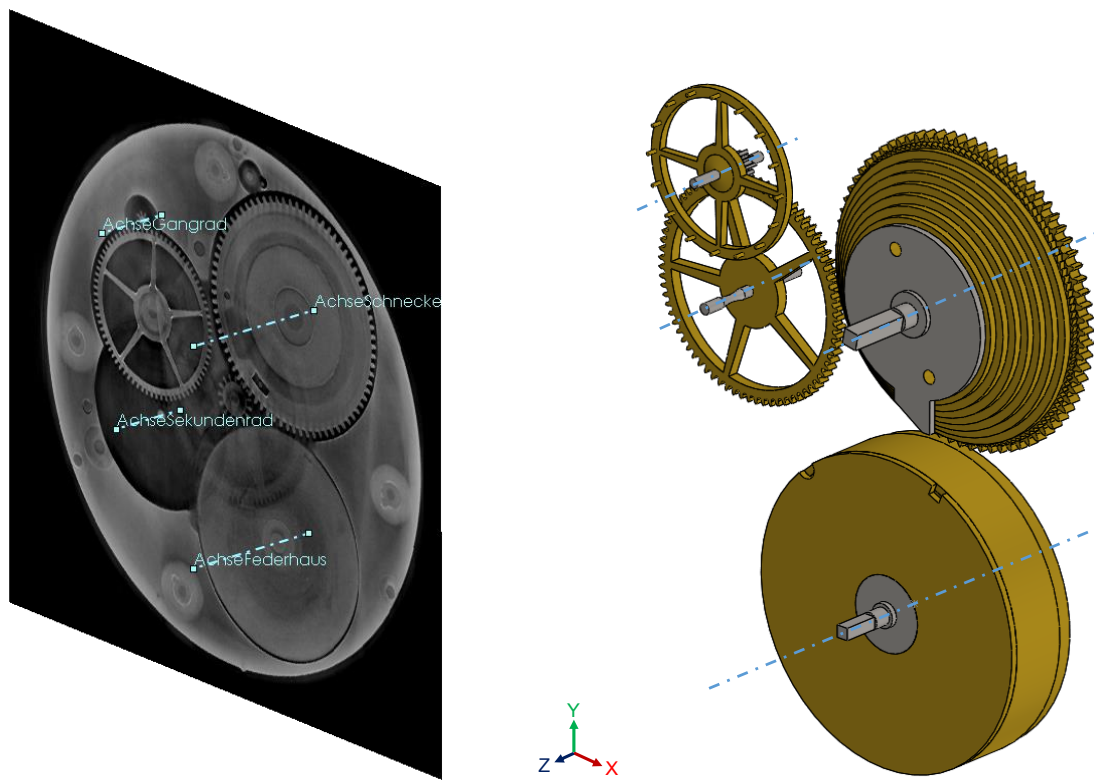


Abbildung 4-17: Analyse der Ausgangsbedingungen: Volumenvisualisierung (links), einzelne Schichtbildsequenz (rechts)

4.4.3 Modellierung

Um eindeutige Ausgangsbedingungen zwischen Ist- und Soll-Objekt und somit zwischen CT- und CAD-Umgebung zu erhalten, erfolgt zuerst eine Registrierung beider Datensätze. Aufgrund einer Vielzahl an eindeutigen Referenzen, die über das Räderwerk bestimmt werden können, bieten sich mathematisch eindeutige Verfahren für eine Registrierung an. Dabei werden verschiedene geometrische Grundelemente in korrespondierenden Bereichen beider Datensätze miteinander registriert.

Abbildung 4-18 verdeutlicht anhand einer ausgewählten CT-Sequenz und dem entsprechenden CAD-Soll-Modell die Ausgangssituation. Für die Registrierung sind eine Auswahl korrespondierender Referenzelemente beider Modelldaten gekennzeichnet. Diese umfassen die Achsen der jeweiligen Triebe, des Federhauses und der Schnecke. Darüber hinaus sind noch mindestens eine Ebene und ein Referenzpunkt ableitbar.



Schichtbildsequenz des Datensatzes mit Referenzachsen bereits vorhandener Soll-Elemente

CAD-Soll-Modell zur Referenzierung mit Energiespeicher und Schnecke

Abbildung 4-18: Isometrische Ansicht des CT- und CAD-Datensatzes mit einer Auswahl korrespondierender Referenzen

Auf dieser eindeutigen Basis erfolgt gezielt die Anpassungskonstruktion des Räderwerkes in der CAD-Umgebung. In funktioneller Kongruenz ist so eine interaktive Nutzung der CT-Objektinformationen sichergestellt. In Tabelle 4-4 werden anhand des Minutenrades wesentliche Arbeitsfolgen der Modellierung erläutert. Dazu werden zunächst ergänzende Schichtbildansichten erstellt, in denen primär das Minutenrad und dessen Dimensionen abgebildet sind.

Anschließend werden anhand verschiedener Referenzen (z.B. Achsen, Punkte, Abstände, Schichtansichten) Parameter und Grenzen definiert. Diese dienen als Grundlage der Skizzengeometrie und des Volumenmodells. Dabei können die Referenzen sowohl als Modellreferenz (z.B. Achse) als auch als Konstruktionsreferenz (z.B. Schichtbild = Schnittansicht = Symmetrieebene) dienen.

Tabelle 4-4: Schritte zur Modellierung des Minutenrades (Auszug)

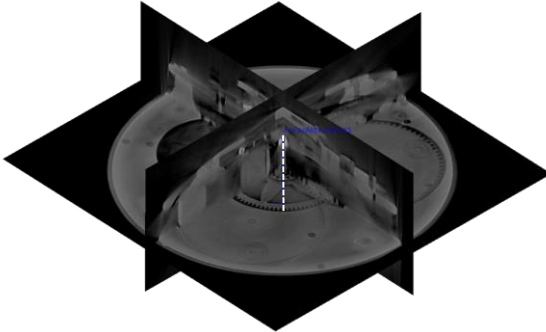
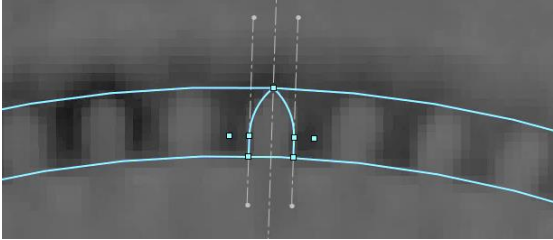
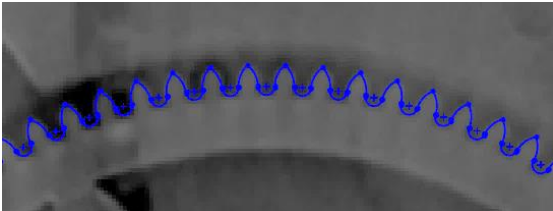
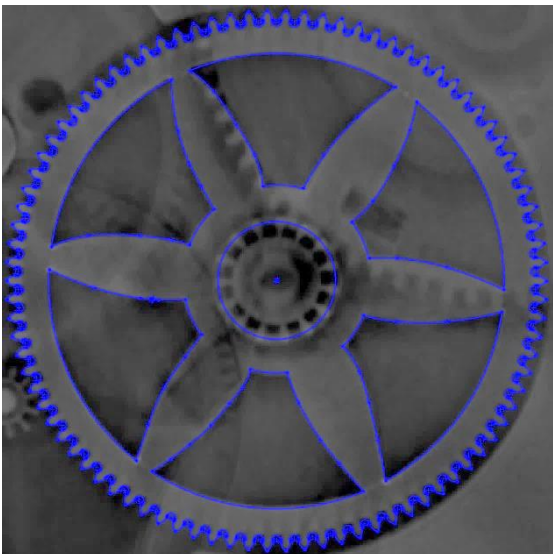
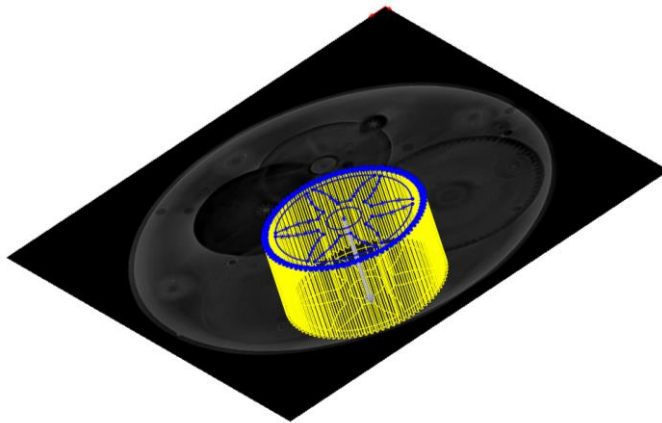
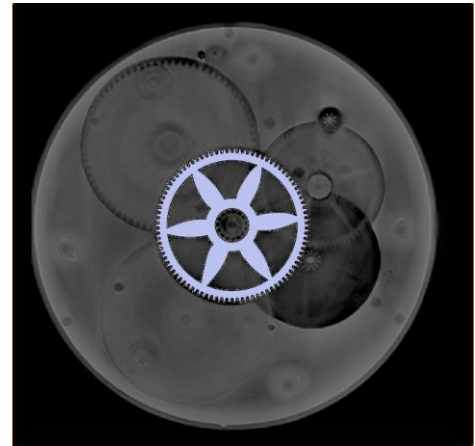
Arbeitsschritt	Abbildung
<p><i>Ergänzung weiterer Referenzen zur Bestimmung der Bauteildimensionen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Schichtbildansicht der Vorderseite und der fehlenden kartesischen Ansichten • Referenzelemente - Achse des Triebes 	
<p><i>Konstruktion der Zahnform eines Zahnes</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung der Zahnbreite, des Abstandes und des Eingriffswinkels • Segmentierung der Zahngrenzen und des Kopf- und Fußkreises • Erstellung weiterer Referenzen zur Bestimmung der Zahngeometrie 	
<p><i>Modellierung aller Zähne</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Vervollständigung der Zahngeometrie • Kreismuster zur Replikation aller Zähne entlang des Zahnrades 	
<p><i>Segmentierung der Stege und des Innenringes</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Konturableitung und Anpassung einzelner Skizzengeometrien • Spiegelung anhand ergänzender Schichtbilder (Dreiergruppe) • Anpassung / Korrektur einzelner Skizzenelemente • Erstellung einer geschlossenen Skizzengeometrie 	

Abbildung 4-19 zeigt die Erstellung des Volumenmodells anhand der Skizzengeometrie. Dafür wird über die Referenzierung ergänzender axialer Schichtansichten (Rückansicht Zahnrad) die Zahnradbreite bestimmt. Diese Ansicht wird als Begrenzung für die dreidimensionale Austragung verwendet. Ebenso kann eine bildanalytische Bestimmung der Zahndicke anhand orthogonaler Schichtansichten erfolgen. Dabei wird die Zahnradbreite als numerischer Wert für die Austragung angegeben (Abbildung 4-19, links).



*Austragung der Skizzenkontur
(exemplarische Darstellung)*



*Rückansicht mit Volumenmodell
des Minutenrades*

Abbildung 4-19: Erstellen eines Volumenmodells aus der Skizzengeometrie

Die Schritte zur Registrierung und die Beschreibung einzelner Modellierungsabfolgen bilden einen Auszug des Gesamtprozesses. In den darin verwendeten Repräsentationsformen und Funktionselementen werden konsekutiv das Kleinbodenrad und die Triebe modelliert und schließlich die verbleibenden Baugruppen-Elemente angepasst.

4.5 Auswertung

Um den Vorzug der entwickelten Methodik zu verdeutlichen, ist ein Vergleich mit dem ursprünglich etablierten Prozess notwendig. Dies erfolgt anhand der Anwendungsbeispiele. Dabei müssen Kriterien betrachtet werden, die eine zuverlässige und objektivierbare Bewertung ermöglichen. Diese sollten sich an den abgeleiteten Defiziten des vorbeschriebenen Prozesses (Abschnitt 1.2) orientieren. Folgende Punkte sind somit quantitativ zu bewerten:

- Art, Anzahl und Inhalt an Schrittfolgen
- Bearbeitungsaufwand für einzelne Schrittfolgen und den Gesamtprozess
- Anzahl unterschiedlicher Systeme (z.B. Hard- und Software)
- Art und Anzahl der Schnittstellen (z.B. Modell-, System- und Datenschnittstellen)

Um die Anzahl der Schnittstellen bewerten zu können, ist eine Erfassung des jeweiligen Bearbeitungssystems erforderlich. Hierfür ist nicht per se das genutzte System entscheidend, sondern seine methodische Differenz zum vorhergehenden Bearbeitungsschritt.

Bei den Hardwarekomponenten des Anwenders werden in beiden Beispielen die gleichen Voraussetzungen zugrunde gelegt (Tabelle 4-2). Daraus folgt, dass entsprechende Zugriffszeiten für die Auslastung des Arbeitsspeichers vergleichbar sind.

Neukonstruktion eines Individuellen Schädelimplantats

Der in Abschnitt 1.2 dargestellte Prozess (Abbildung 1-2) ist die methodische Grundlage der Neukonstruktion des individuellen Schädelimplantats. Dabei ergeben sich die in Tabelle 4-5 gelisteten Bearbeitungsschritte.

Tabelle 4-5: Bearbeitungsschritte und Zeitaufwand der Prozesskette aus Abschnitt 1.2

Schrittfolgen und inhaltliche Gestaltung		Verwendetes System	Zeitaufwand [min]
1	<i>Auswahl, Import und Visualisierung der Sequenz</i>	VOLUME GRAPHICS VGStudio Max	5
2	<i>Segmentierung und Modellerstellung</i> <ul style="list-style-type: none"> • Auswahl des Segmentierungsverfahren • Erstellung einer definierten Ausrichtung • Selektion angrenzender Modellbereiche 		25
3	<i>Modellbearbeitung und Flächenrückführung</i> <ul style="list-style-type: none"> • Reduktion und Optimierung der Netzstruktur • Modellerstellung: Entfernung der provisorischen Defektdeckung, Separieren und Präparieren des Defektanschlussbereiches • Flächenrückführung des angrenzenden Bereiches 	POLYWORKS® Ms 2020	30
			30
			90
4	<i>Konstruktion des Schädelimplantats</i> <ul style="list-style-type: none"> • Modellimport und Diagnose im CAD-System • Erstellung von Konstruktionsreferenzen • Bildung von Modellreferenzen zur Erstellung einer Hüllgeometrie • Konstruktion der Grund- und Füllstruktur • Ausarbeitung des endgültigen Modells 	SOLIDWORKS® 2020	10
			30
			75
			55
			15
Gesamt			06:05 h ± 365 min

Aus Tabelle 4-5 ergeben sich vier primäre Prozessschritte, die jeweils mit Iterationen versehen sind. Diese resultieren aus dem Unterschied von gewünschter und erhaltener Ergebnisqualität. Dafür werden alle drei genannten Softwaresysteme verwendet. Art und Anzahl der Schnittstellen sind dabei äquivalent zu denen in Abbildung 1-2. Insgesamt ergibt sich daraus eine Gesamtbearbeitungszeit von etwa sechs Stunden.

Basierend auf dem in Abschnitt 4.3.3 dargestellten Modellierungsprozesses der entwickelten Prozesskette ergeben sich folgende Schrittfolgen und Bearbeitungszeiten (Tabelle 4-6).

Tabelle 4-6: Bearbeitungsschritte und Zeitaufwand der entwickelten Prozesskette

Schrittfolgen und inhaltliche Gestaltung		Verwendetes System	Zeitaufwand [min]
1	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl, Import und Modellvisualisierung • Initiale Ausrichtung und Eingrenzung auf Schädelbereich • Erstellen der Symmetrieebene, einzelner Schnittebenen und ausgewählter Referenzelemente • Auswahl und Übertragung in die CAD-Umgebung 	CTINA	5
			10
			5
2	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktion des Implantat-Rohlings 	CAD und CTINA	60
3	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung des finalen individuellen Hybridimplantats - Gestalten der Grund- und der Wabenstruktur • Erstellung der Befestigungsbereiche (Bohrungen) • Prüfung durch bidirektionale Übertragung: <ul style="list-style-type: none"> a) anhand aller Informationen und Randbedingungen in der CT-Umgebung CTINA → Prüfung der geometrischen Gestalt und des Sitzes anhand der kombinierten Visualisierung oder b) via Oberflächenvisualisierung der Schädelknochenstruktur in der CAD-Umgebung 	CAD und CTINA	30
			20
			20
Gesamt			02:30 h ± 150 min

Im Vergleich zu Tabelle 4-5 sind bei diesem Prozessablauf drei Prozessschritte notwendig, die durch den interaktiven Charakter abweichende inhaltliche Schwerpunkte bilden. Der gesamte Modellierungsprozess wird kontinuierlich aus dem CAD-System abgeleitet. Die in Schritt Eins vorrangige Nutzung der CT-Umgebung führt im vorliegenden Beispiel zu einer komfortableren Ausgangssituation für die nachfolgende Modellierung. Der zeitliche Aufwand des Gesamtprozesses beträgt etwa zwei Stunden und dreißig Minuten. Infolge der interaktiven Anwendung beider Umgebungen ist jedoch die genaue Anzahl der Schnittstellen für den Prozess weder direkt noch eindeutig bestimmbar. Das Prinzip der Prozesskette beruht auf der Nutzung CAD-assoziierter Systemschnittstellen, die bei der Überführung und Interpretation der jeweiligen Repräsentationsformen Anwendung finden.

Anpassungskonstruktion des Räderwerkes einer historischen Taschenuhr

Für die Anpassungskonstruktion des Räderwerkes sind die Methoden der Bildanalyse geeignet. Wie in Abschnitt 2.3 bereits analysiert, bestehen dabei jedoch die gleichen Defizite. Somit bleiben die äquivalenten Bewertungskriterien dennoch anwendbar. Im Gegensatz zur schwellwertbasierten Oberflächenextraktion (Abschnitt 2.3, #2) entfällt bei der Taschenuhr die Modellbearbeitung. Der Segmentierungsschritt wird dazu verwendet, die Einzelteile zu separieren und deren Parameter zu bestimmen. Tabelle 4-7 bildet die entsprechenden Schrittfolgen ab.

Tabelle 4-7: Bearbeitungsschritte zur Anpassung des Räderwerkes über die Methoden der Bildanalyse

Schrittfolgen und inhaltliche Gestaltung		Verwendetes System	Zeitaufwand [min]
1	<i>Auswahl, Import und Visualisierung der Sequenz</i>	VOLUME GRAPHICS myVGL	5
2	<i>Segmentierung und Bildanalyse</i> <ul style="list-style-type: none"> • Segmentierung der Einzelteile • Bildanalyse: Messung und Dokumentation einzelner Objektparameter 	VOLUME GRAPHICS myVGL	240
3	<i>Anpassung vorhandener Konstruktionen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von Konstruktionsreferenzen (Ebenen und Achsen als Basisreferenz) • Anpassungskonstruktion der Räder und Triebe • Prüfung und Anpassung der Baugruppe (Erstellung neuer Verknüpfungen) 	AUTODESK® INVENTOR® Professional 2020	90
Gesamt		05:35 h \pm 335min	

Grundlegend können drei primäre Prozessschritte kategorisiert werden, die eine Gesamtbearbeitungszeit von fünf Stunden und fünfunddreißig Minuten umfassen. Es werden zwei separate Systeme angewandt, die während des Prozesses nicht kontinuierlich miteinander interagieren. Somit bestehen aufgrund von Modell- und Systemkonvertierungen keine Systemschnittstellen.

Für den entwickelten Prozess aus Abschnitt 4.4.3 ergeben sich die in Tabelle 4-8 aufgeführten Schrittfolgen mit ihren entsprechenden Bearbeitungszeiten.

Tabelle 4-8: Abfolge zur Anpassung des Räderwerkes anhand der entwickelten Prozesskette

Schrittfolgen und inhaltliche Gestaltung		Verwendetes System	Zeitaufwand [min]
1	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl, Import und Modellvisualisierung • Erstellung von Referenzen in beiden Modellbasen • Registrierung der Modelle 	CTINA und CAD	25
2	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung der fehlenden Räder und Triebe über ergänzende Schnittansichten, diverse Referenzelemente, Kontur- und Geometrieableitung 	CAD und CTINA	60
3	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung der Baugruppe 	CAD und CTINA	30
Gesamt		01:55 h \pm 115 min	

Im Vergleich zu Tabelle 4-7 sind bei diesem Prozessablauf ebenfalls drei primäre Prozessschritte notwendig, die eine Gesamtbearbeitungszeit von etwa zwei Stunden ergeben. Dies entspricht einer Zeitersparnis von ungefähr sechzig Prozent des Referenzprozesses. Die genaue Anzahl der Schnittstellen ist analog der Analyse des individuellen Schädelimplantats nach Tabelle 4-6 weder direkt noch eindeutig bestimmbar. Der ursprüngliche Prozess via Bildanalyse beinhaltet wesentliche Ungenauigkeiten. Durch den primär manuell geprägten Ablauf zeigen sich Informations- oder Genauigkeitsverluste. Diese resultieren aus einer fehlerhaften Bestimmung einzelner Parameter und der diskontinuierlichen Übertragung auf das vorhandene virtuelle Modell.

Mit den beiden Beispielen wird die gezielte Anwendung computertomographischer Daten in der Produktentwicklung bestätigt. Dabei zeigt sich eine universelle Übertragbarkeit des Prozesses auf unterschiedliche medizinische und technische Anwendungsbereiche. Darüber hinaus werden die generelle Systemunabhängigkeit und damit auch der Transfer auf optional unterschiedliche CAD-Systeme nachgewiesen.

In der vorliegenden Arbeit wurde der technische Demonstrator als systemunabhängiges Element entwickelt. Somit besteht der Prozess aus zwei Systemen. Jedoch verdeutlichen die Anwendungsbeispiele die Notwendigkeit, vor allem bei Neukonstruktionen, in der CT-Umgebung zunächst eine einheitliche Ausgangssituation zu erstellen. Auf diese Weise wird daraufhin ein kontinuierlicher Prozess in der CAD-Umgebung gewährleistet. Unabhängig von der Problemstellung ist es ebenso möglich, den Gesamtprozess aus der CAD-Umgebung zu bearbeiten. Somit kann auf direktem Weg eine analytische Modellstruktur aufgebaut und für weitere virtuelle Prozesse der Produktentwicklung vorbereitet werden. Es werden sowohl eine parametrische Modellstruktur als auch eine zusammenfassende sequenzielle Konstruktionshistorie sichergestellt. Dies ermöglicht bei Bedarf eine nahezu beliebige Anpassung des Volumenmodells im Sinne einer Änderungskonstruktion sowie auch eine entsprechende Weiterverarbeitung in den Werkzeugen der Produktentwicklung.

Mit Hilfe der CT-Umgebung und der integrierten methodischen Bestandteile sowie der Interaktions- und Kommunikationsebene wurden entsprechende Funktionselemente im Prozess eingebettet, die nunmehr eine direkte Anwendung computertomographischer Daten ermöglichen. Im Vergleich mit den methodisch bisher etablierten Verfahren können so zeitliche und materielle Ressourcen eingespart und damit auch ökonomische Faktoren reduziert werden. Ebenso wird der Einsatz notwendiger Transformationen infolge von Informations- und Genauigkeitsverlusten verringert. Dies erfolgt über die Abbildung eines digital durchgehenden Prozesses mit deutlich verminderten Schnittstellen, der zudem auch eine Reduktion von Modell- und Datenkonvertierungen beinhaltet.

Die genannten Beispiele zeigen, dass wesentliche Schrittfolgen wie eine grundsätzliche Segmentierung dichtebasierter Objekteigenschaften zur Ableitung von Modellstrukturen vermieden werden können. Auf diese Weise werden zusätzliche Nachbearbeitungsschritte, wie beispielsweise eine Modellbearbeitung ebenfalls aus dem Prozess eliminiert.

Über die Erstellung von Modell- und Konstruktionsreferenzen wurde mittels gezielt generierter Repräsentationsformen eine nunmehr interaktive Modellierungsgrundlage erzeugt. Allerdings erfolgt hier auch ein Segmentierungsschritt. Der Unterschied zu den bisher methodisch etablierten Verfahren besteht hingegen in einer gezielten Erstellung dieser Objektinformationen als Bestandteil der Modellierung. Somit entsteht ein diskontinuierlicher Informations- und Genauigkeitsverlust. Alle Schwündefolgen erfolgen kalkuliert mit der abschließenden Generierung gewünschter Objektinformationen als Repräsentationsformen. Zudem gibt es immer noch die Möglichkeit eines kontinuierlichen Zugriffs auf alle Originaldaten. Sämtliche Abläufe können also rekursiv und iterativ beeinflusst werden. Somit sind alle zur individuell angefragten Problemlösung vorhandenen digitalen Informationen über die gesamte Prozesskette hinweg verfügbar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Die Computertomographie hat sich neben der medizinischen Diagnostik in den letzten Jahren zu einem zentralen Bestandteil der zerstörungsfreien Bauteilprüfung entwickelt. Dabei stellen die Qualitätssicherung und die Erforschung neuer Fertigungstechnologien eine zentrale Aufgabe dar.

Bisher werden computertomographische Daten innerhalb der Produktentwicklung nur über aufwändige Vorbereitungsschritte und mit komplexen Softwaresystemen eingesetzt. Die in der Praxis aktuell etablierte Vorgehensweise ist ein mehrstufiger Prozess, dessen Datenbasis ein diskretes Volumenmodell des erfassten Objektes ist. Die Aufgaben einer virtuellen Produktentwicklung hingegen werden durch eine analytisch dreidimensionale Modellstruktur bestimmt, die mit einem gängigen CAD-System modelliert wird.

Mit den aktuell angewandten Prozessketten zeigt sich, dass keine Möglichkeit zur direkten Nutzung computertomographischer Daten in der Produktentwicklung existiert. Ebenso gibt es bislang keine standardisierten Schnittstellen zur kontinuierlichen Übertragung der Daten und keine elementaren Funktionen zu ihrer gezielten Verarbeitung. Darüber hinaus ist die Abfolge bisher mit erheblichen Informations- und Genauigkeitsverlusten verbunden. Somit kann sowohl methodisch als auch technisch ein systematisches Problem identifiziert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Prozesskette zu entwickeln, die computertomographische Daten direkt in Werkzeugen der Produktentwicklung anwendet. Dafür bildet das CAD-System die funktionelle Basis.

Um eine solche Prozesskette zu realisieren, hat die vorliegende Arbeit eine Verknüpfung zwischen diskreten (CT) und analytischen (CAD) Volumendaten erarbeitet. Dieser Prozess besteht formell aus zwei voneinander unabhängigen systemischen Umgebungen. Beide sind interaktiv über einen dritten Baustein der Überführung und Interpretation miteinander verbunden.

Die CT-Umgebung adressiert eine Basis zur Verwaltung und Steuerung computertomographischer Daten und deren vielfältige Objektinformationen. Die CAD-Umgebung hingegen definiert die technologische Basis mit einer systematischen Vorgehensweise und entsprechenden Methoden zur Entwicklung einer volumenbasierten analytischen Modellstruktur. Beide Umgebungen erfassen und führen die begleitenden prozessualen Strukturen.

Über eine gemeinsame Datenbasis werden die ausgewählten computertomographischen Sequenzen der CT-Umgebung auf ihre gezielte Anwendung vorbereitet. Dies schafft eine essenziell notwendige einheitliche Ausgangslage für einen konsistenten interaktiven Prozess. Mit

der Überführung und Interpretation der Daten ist eine individuelle Transformation der Objektinformationen in die CAD-Umgebung gegeben, welche vorrangig über Repräsentationsformen erfolgt. So entsteht eine direkte Kommunikation beider Umgebungen.

Durch eine Kommunikations- und Interaktionsebene werden dabei die Wechselbeziehungen der beiden Umgebungen über einen systematischen Kreislauf abgebildet, der zugleich den bidirektionalen Informationsfluss realisiert. Diese Wechselbeziehungen sind über allgemeine und erweiterte Grundabfragen definiert und können mit Hilfe von abgeleiteten Abfragen nutzerspezifisch generiert werden. Verschiedene methodische Funktionselemente ermöglichen dabei eine adaptive Anpassung der jeweils vom Konstrukteur gewünschten Objekteigenschaften. Dies erfolgt über eine intuitive und teilweise automatisierte Handhabung, wobei der Anwender das endgültige Ergebnis in begrenztem Maße regulieren kann. Dafür wurden im Verlauf dieser Arbeit Lösungskonzepte für jede Repräsentationsform vorgestellt und exemplarisch veranschaulicht.

Technischer Demonstrator der Arbeit ist der Softwarebaustein „CTINA“, der als Stand-Alone-Lösung systemunabhängig in beliebige CAD-Systeme integrierbar ist. CTINA verarbeitet effizient diskrete dreidimensionale Daten. Methodische Kernkompetenzen sind dabei die Verwaltung und Visualisierung verschiedener computertomographischer Objektinformationen, die Schnittstellenfunktion zu Werkzeugen der Produktentwicklung und die grundlegenden Geometriebeschreibungen. Die Schnittstellenfunktionen beziehen sich in der vorliegenden Arbeit auf die Anwendung in mechanischen CAD-Systemen.

Mit je einem medizinischen und technischen Anwendungsbeispiel wird die Prozesskette abschließend verifiziert. Dabei zeigt sich, dass auch komplexe systemische Fragestellungen mit Hilfe computertomographischer Daten lösungsorientiert bearbeitet werden können. Zudem konnte eine Übertragbarkeit der Methodik auf prozessual verschiedene Problemstellungen sowie auch auf technisch verschiedene CAD-Systeme gezeigt werden.

Der Vorteil der direkten Anwendung computertomographischer Daten gegenüber dem bis dato etablierten Prozessablauf über eine komplette Modellsegmentierung, Datenaufbereitung und Flächenrückführung ist die bedarfsgerechte Bereitstellung von Objektinformationen. Dies erfolgt nicht als zusätzlicher Vorbereitungsschritt, sondern integriert in das eigentliche Lösungskonzept.

5.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellte Prozesskette verdeutlicht die Anwendung computertomographischer Daten in Werkzeugen der Produktentwicklung. Im Umfeld der zerstörungsfreien Bauteilprüfung ist perspektivisch auch die Verbindung zu anderen Verfahren vorstellbar. Wirbelstrom- und Ultraschall-Prüfungen werden industriell bereits angewandt, sind bisher jedoch nicht mit Prozessketten der Produktentwicklung verbunden. Eine Erweiterung des Einsatzspektrums würde somit auch eine methodenspezifische Anpassung voraussetzen.

Ebenso kann die Erweiterung auch im Hinblick auf CAD- und CAE-Werkzeuge erfolgen. In der Regel bedürfen CAD-Modelle diverser Anpassungen, um sie für Untersuchungen zur Absicherung von Produkteigenschaften nutzbar zu machen [144–146]. Folglich könnten ergänzende Informationen aus Metadaten oder Funktionsbausteine für erweiterte abgeleitete Repräsentationsformen entwickelt werden. Diese ermöglichen eine Abbildung nahezu finaler Modellstrukturen einschließlich ihrer zu untersuchenden Eigenschaften wie etwa CAE-Netzmodelle. Eine erste Studie zeigt eine Strömungssimulation von Ist-Daten zur essenziellen Kühlung eines Werkzeugeinsatzes [147].

Darüber hinaus kann nicht nur eine bildbasierte Struktur im DICOM[®]-Standard verwendet werden. Es ist auch möglich, rein prozessorientierte Eigenschaften als Metadaten zu definieren. Sie sind so als konsistentes Informationsmodell nutzbar. Basierend auf dem DICONDE-Standard für den Einsatz zerstörungsfreier Prüfungen (ZfP) könnten somit gezielte Ergänzungen im Datenformat mit konstruktionsrelevanten Informationen erfolgen [148]. Ihre durchgehende Anwendung setzt das Vorhandensein integrativer Schnittstellen und zusätzlicher Funktionsbausteine in den Anwendersystemen voraus, die diesen Ansatz methodisch unterstützen. Ein exemplarischer Einsatz könnte die Analyse und Eingrenzung von Objektdefekten (z.B. Risse) oder -defiziten (z.B. Poren) bereits bei der Erfassung sein, welche als Konstruktionsempfehlung im CAD-System resultieren [149].

Die in dieser Arbeit vorgestellte Datenbasis ermöglicht ebenso eine Ergänzung fehlender Objektbereiche. Diese können das mögliche Korrelat industrieller, multifaktoriell bedingter Materialdefekte sein. Aus medizinischer Sicht spielen kausal traumatische, entzündliche oder tumoröse Strukturläsionen eine wichtige Rolle. Zur Substitution fehlender Objektbereiche können Volumeninformationen über die Betrachtung angrenzender Voxel-Eigenschaften erzeugt werden. Diese Methode ist für Regionen mit einer limitierten Größe sehr gut anwendbar, jedoch bedeutet ein Defekt auch immer eine inkonsistente Daten- und Informationslage. Somit ist es erforderlich, wesentliche bildanalytische Voraussetzungen wie etwa die Bereichsgröße und ihre Grauwertverteilung im angrenzenden Gewebe anzuwenden. Das Konzept ist methodisch ebenso auf industrielle Objekte übertragbar. Hierbei werden analog zur medizinischen Anwendung entsprechende Werkstoffdefekte substituiert. [150]

Heutzutage steht die Produktqualität in untrennbarer Verbindung zur industriellen Qualitätssicherung. Innerhalb der Prozesskette ist diese grundsätzlich auch über den Einsatz zusätzlicher Funktionsbausteine möglich. Ergänzend zur Registrierung vorhandener Soll-Modelle können so mit Hilfe eines sogenannten adaptiven CAD-Slicers ohne besonderen methodischen Aufwand zweidimensionale Soll-Ist-Vergleiche erfolgen [151]. Diese Variante hat neben methodisch-prozessualen auch technische Vorteile (z.B. Performance). Die dafür notwendige

Voraussetzung ist die Ergänzung entsprechender Auswahlfunktionen zur Selektion äquivalenter Schichtsequenzen sowohl im Ist- als auch im Soll-Datensatz. Dadurch könnten ergänzende Analysen wie etwa die Bestimmung der Rauheit durchgeführt werden [152].

Die exemplarisch vorgestellten Methoden in Abschnitt 3.5 sind eine Demonstration zur perspektivischen Umsetzung verschiedener Formen einer prozessualen Interaktion. Interessant erscheint dabei vor allem die Integration von Algorithmen der Künstlichen Intelligenz. Im Fokus stehen in gegenwärtigen Untersuchungen die automatische Detektion und Überführung von Konturen in analytische Geometrien [153]. Ebenso vorstellbar ist die Anwendung materialspezifischer Partikel zur exakten Lokalisierung von Oberflächen oder Volumendefekten [154].

Um die Anwenderfreundlichkeit der Prozesskette oder des Softwarebausteins CTINA zu verbessern, werden gegenwärtig virtuelle Assistenten (Wizard) erarbeitet [155]. Zur vereinfachten Bedienung wäre der Einbau optischer und in den Prozess integrierter Interaktionssysteme von Vorteil. Diese können aus visuell-gestützten Schemata oder auch Textfeldern bestehen. Hier besteht eine weitere Option zum Einsatz künstlicher Intelligenz.

Literaturverzeichnis

- [1] Reckter, B.: *Geschärfter Blick aufs Wesentliche*. In: *VDI nachrichten* (24.05.2019), Ausgabe Nr. 21-22, S.16.
- [2] Kumpová, I.; Vavřík, D.; Vopálenský, M.: *Reading closed historical manuscripts using dual-source dual-energy X-Ray tomography*. 8th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2018), Wels, Österreich, 06.-09. Februar 2018.
- [3] Stoessel, R.; Donner, T.; Mosch, M., et al.: *Computed Tomography Testing at remains of a glider from Otto Lilienthal*. 8th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2018), Wels, Österreich, 06.-09. Februar 2018.
- [4] VOLUME GRAPHICS: *Ta-cheru [2018]: The Digital Mummy*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cuZr0q0RtU0>. Überprüfungsdatum: 10.07.2020.
- [5] Ursella, E.; Giudiceandrea, F.; Boschetti, M.: *A Fast and Continuous CT scanner for the optimization of logs in a sawmill*. 8th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2018), Wels, Österreich, 06.-09. Februar 2018.
- [6] Visser, W.; Schwanninger, A.; Hardmeier, D., et al.: *Automated Comparison of X-Ray Images for Cargo Scanning*. In: Claycomb, William R. (Hrsg.): 2016 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), 24.-27. Oktober 2016, Orlando, Florida, United States, Piscataway, NJ, IEEE.
- [7] Kastner, J.; Heinzl, C.; Plank, B., et al.: *New X-ray computed tomography methods for research and industry*. 7th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2017), Leuven, Belgium, 07.-09. Februar 2017, 08.02.2017.
- [8] Sackewitz, M.: *Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik: Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. 2. vollständig aktualisierte und erweiterte Auflage, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2015 (Vision-Leitfaden 15), ISBN 978-3-8396-0913-2.
- [9] Associates, W.: *Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, 2019, ISBN 978-09913332-5-7.
- [10] Süß, M.; Hofmann, D.; Schöne, C., et al.; DDMC2018: *Investigation on Geometrical Accuracy and Their Measuring Capabilities in Electron Beam Melting for Different Machine Generations*. In: DDMC 2018 - Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference, Proceedings: Direct Digital Manufacturing Conference, Berlin, 14.-15. März 2018, Stuttgart, Fraunhofer Verlag, 2018, ISBN 978-3-8396-1320-7.
- [11] VDI / VDE 2630 Blatt 1.4 - Ersatzlos zurückgezogen: *Computertomografie in der industriellen Messtechnik*. Richtlinie: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Juni 2010.
- [12] Carmignato, S.; Dewulf, W.; Leach, R.: *Industrial X-ray computed tomography*. Springer, Cham, 2018, ISBN 978-3-319-59573-3.
- [13] Lindemann, U.: *Handbuch Produktentwicklung*. Hanser Verlag, München, 2016, ISBN 978-3-446-44518-5.
- [14] Vajna, S.; Bley, H.; Hehenberger, P., et al.: *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-36039-1.

- [15] VDI 2211: *Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung*. Richtlinie: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, März 2003.
- [16] VDI 2221 Blatt 2: *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*. Richtlinie: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, November 2019.
- [17] Hammerschmidt, C.: *Produktentwickler gehen neue Wege*. In: VDI nachrichten 2016 (20.10.2016), URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/produktion/produktentwickler-gehen-neue-wege/>. Überprüfungsdatum: 29.07.2020.
- [18] Sembdner, P.: *Rechnergestützte Planung und Rekonstruktion für individuelle Langzeit-Knochenimplantate am Beispiel des Unterkiefers*. Sächsische Landesbibliothek- Staats- und Universitätsbibliothek Dresden; TU Dresden, Dissertation, 2017.
- [19] DIN EN ISO 15708-3:2019: *Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie - Teil 3: Durchführung und Auswertung (DIN EN ISO 15708-3:2019)*. Internationale Norm: Deutsches Institut für Normung, Berlin, September 2019 (Deutsche Fassung).
- [20] VDI 5620: *Reverse Engineering von Geometriedaten*. Richtlinie: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, März 2017.
- [21] SIEMENS HEALTHINEERS AG: *SOMATOM On.site: Mobile Kopf CT-Bildgebung*. URL: <https://www.siemens-healthineers.com/de/computed-tomography/mobile-head-ct/somatom-on-site>. Überprüfungsdatum: 28.05.2021.
- [22] DORNHEIM MEDICAL IMAGES GMBH: *Dornheim Segmenter*. URL: <https://dornheim.tech/en/segmenter>. Überprüfungsdatum: 28.05.2021.
- [23] DUWE-3D AG: *PolyWorks®*, URL: <https://www.duwe-3d.de/de/products/polyworks>. Überprüfungsdatum: 28.05.2021.
- [24] AUTODESK® INC.: *Autodesk Inventor Professional 2020: Handbuch*. URL: <http://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2020/DEU/>. Überprüfungsdatum: 31.07.2020.
- [25] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R.: *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Springer Vieweg, Berlin, 2014, ISBN 978-3-662-43815-2.
- [26] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Pahl / Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-642-29568-3.
- [27] Radon, J.: *Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten*. Leipzig, 1917, S.262-279.
- [28] Kalender, W. A.: *Computertomographie: Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen*. 2. Auflage, Publicis Corp. Publ, Erlangen, 2006, ISBN 978-3-89578-215-2.
- [29] Christoph, R.; Neumann, H. J.: *Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik: Präzise, wirtschaftlich und universell*. 2. Auflage, Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 2012 (Die Bibliothek der Technik 331), ISBN 978-3-86236-032-1.
- [30] Kroll, J.: *Aufgabenangepasste, kontrollierte Oberflächenextraktion aus 3D-Computertomographiedaten*. Universität Stuttgart, Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, Dissertation, 2014.
- [31] Buzug, T. M.: *Computed tomography: From photon statistics to modern cone-beam CT; with 10 tables*. Springer, Berlin, 2008, ISBN 978-3-642-07257-4.

- [32] Handels, H.: *Medizinische Bildverarbeitung: Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die computergestützte ärztliche Diagnostik und Therapie*. 2. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8351-0077-0.
- [33] DIN EN ISO 15708-1:2019: *Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie - Teil 1: Terminologie (DIN EN ISO 15708-1:2019)*. Internationale Norm: Deutsches Institut für Normung, Berlin, September 2019 (Deutsche Fassung).
- [34] Kiefel, D.: *Quantitative Porositätscharakterisierung von CFK-Werkstoffen mit der Mikro-Computertomografie*. Universitätsbibliothek der TU München, Dissertation, 2017.
- [35] DIN EN ISO 12052: *Medizinische Informatik - Digitale Bildverarbeitung und Kommunikation in der Medizin (DICOM) inklusive Workflow and Datenmanagement (ISO 12052: 2006)*. Deutsche Norm: Deutsches Institut für Normung, Berlin, Dezember 2017.
- [36] DIN 6862-2: *Identifizierung und Kennzeichnung von Bildaufzeichnungen in der medizinischen Diagnostik - Teil 2: Weitergabe von Röntgenaufnahmen und dazugehörigen Aufzeichnungen in der digitalen Radiographie, digitalen Durchleuchtung, digitalen Volumentomographie und Computertomographie*. Deutsche Norm: Deutsches Institut für Normung, Berlin, September 2019.
- [37] ISO / IEC 15948: *Information technology - Computer graphics and image processing - Portable Network Graphics (PNG): Functional specification*. Internationale Norm: Internationale Organisation für Normung, Genf, Schweiz, 2004.
- [38] ASTM E2339-15: *Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE)*. Internationale Norm: ASTM International, United States, 2015.
- [39] ASTM E3169-18: *Standard Guide for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE)*. Internationale Norm: ASTM International, United States, 2018.
- [40] ASTM E2767-13(2018): *Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for X-ray Computed Tomography (CT) Test Methods*. Internationale Norm: ASTM International, United States, 2013.
- [41] ASTM E2663-14(2018): *Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for Ultrasonic Test Methods*. Internationale Norm: ASTM International, United States, 2018.
- [42] Clunie, D. A.: *DICOM Standard Status: Status der Versionen des DICOM Standard*, URL: <http://www.dclunie.com/dicom-status/status.html#DiffsStandard2020b2020c>. Überprüfungsdatum: 11.12.2020.
- [43] VDI / VDE 2630 Blatt 1.2: *Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik*. Richtlinie: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Juni 2018.
- [44] Kasperl, S.: *Qualitätsverbesserung durch referenzfreie Artefaktreduzierung und Oberflächennormierung in der industriellen 3D-Computertomographie*. Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Dissertation, 03.02.2005.
- [45] Oehler, M.: *Interpolations-basierte Sinogrammrestauration zur Metallartefaktreduktion in der Computertomographie*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, ISBN 978-3-658-06081-7.
- [46] Bourne, R.: *Fundamentals of Digital Imaging in Medicine*. Springer, London, 2010, ISBN 978-1-84882-086-9.
- [47] DIN EN ISO 15708-2:2019: *Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsverfahren für Computertomographie - Teil 2: Grundlagen, Geräte und Proben (DIN EN ISO 15708-2:2019)*. Internationale Norm: Deutsches Institut für Normung, Berlin, September 2019 (Deutsche Fassung).

- [48] Guzmán K., S.; Alken, P.: *Operative Anatomie: Körperebenen und Prinzipien der Zugänge*. In: Michel, Maurice Stephan; Thüroff, Joachim W.; Janetschek, Günther; Wirth, Manfred (Hrsg.): *Die Urologie*, Springer Berlin Heidelberg, 2016, S.3–4, ISBN 978-3-642-39940-4.
- [49] Danzenbächer, S.: *Vorlesungsunterlagen - Bildgebende Verfahren*, TU Dresden, Institut für Festkörper und Materialphysik, WS 2014 / 2015.
- [50] Schiele, H.-G.: *Computergrafik für Ingenieure*. Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-23843-7.
- [51] Anderl, R.; Trippner, D.: *STEP STandard for the Exchange of Product Model Data: Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP)*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2000, ISBN 3-519-06377-8.
- [52] ISO 14306: 2012 (2017-11): *Industrial automation systems and integration - JT file format specification for 3D visualization*. Internationale Norm: Internationale Organisation für Normung, Genf, Schweiz, November 2017.
- [53] Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. 8. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2020, ISBN 978-3-662-06733-8.
- [54] Horn, M.: *Aktive Segmentierung*. Bibliothek der Universität Konstanz, Universität Konstanz, Dissertation, 2014.
- [55] Blessing, N.: *Segmentierung von industriellen 3D-CT-Voxelmodellen durch dynamische Schwellwertberechnung*. Universität Stuttgart, Jost-Jetter-Verlag, Heimsheim, Dissertation, 2008 (IPA-IAO-Bericht 475).
- [56] Ohser, J.: *Angewandte Bildverarbeitung und Bildanalyse: Methoden, Konzepte und Algorithmen in der Optotechnik, optischen Messtechnik und industriellen Qualitätskontrolle*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2018, ISBN 978-3-446-44933-6.
- [57] Dössel, O.: *Bildgebende Verfahren in der Medizin: Von der Technik zur medizinischen Anwendung*. 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-642-54406-4.
- [58] Hough, P. V.: *Method and means for recognizing complex patterns*. U.S. Patent, Veröffentlichungsnr. 3,069,654, United States, 1962.
- [59] Kass, M.; Witkin, A.; Terzopoulos, D.: *Snakes: Active contour models*. In: *International Journal of Computer Vision* 1 (1988), Nr. 4, S.321–331, DOI 10.1007/BF00133570.
- [60] Süße, H.; Rodner, E.: *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, ISBN 978-3-8348-2606-0.
- [61] LABORATORY FOR OPTICAL AND COMPUTATIONAL INSTRUMENTATION: *Image J - An open platform for scientific image analysis*. URL: <https://imagej.net/Welcome>. - Aktualisierungsdatum: 24.01.2020. Überprüfungsdatum: 08.12.2020.
- [62] Schöne, C.: *Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik*: TU Dresden, 1. Auflage, Dr. Hut, München, Habilitation, 2009, ISBN 978-3-86853-103-9.
- [63] Seibt, T.: *Umsetzung eines geeigneten Marching Cubes Algorithmus zur Generierung facettierter Grenzflächen*. TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik / CAD, Diplomarbeit, 30.09.2011.
- [64] VOLUME GRAPHICS: *Software for Industrial CT - Products*, URL: <https://www.volumegraphics.com/en/products.html>. Überprüfungsdatum: 08.12.2020.

- [65] Stelzer, R.; Steger, W.: *SolidWorks: Grundlagen der Modellierung und des Programmierens*. Pearson Studium Verlag, 2011, ISBN 978-3-8689-4164-7.
- [66] VDI 2209: *3D-Produktmodellierung*. Richtlinie: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, März 2009.
- [67] DIN EN ISO 19107: *Geoinformation - Raumbezugsschema (ISO 19107:2019)*. Internationale Norm: Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2019.
- [68] DASSAULT SYSTÈMES: *SolidWorks® 2020 Hilfe: Handbuch*. URL: http://help.solidworks.com/2020/German/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm?verRedirect=1. Überprüfungsdatum: 31.07.2020.
- [69] PTC: *Creo Parametric 5.0.6.0 Online-Hilfe: Handbuch*. URL: http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/german/. Überprüfungsdatum: 31.07.2020.
- [70] DASSAULT SYSTÈMES: *Zwei Methoden, um Scan-Daten in ein Volumenkörpermodell zu konvertieren: Halbmanuelle Erstellung: Direkte Netzreferenzierung*. URL: http://help.solidworks.com/2019/german/SolidWorks/scanto3d/c_two_methods_for_converting_scan_data.htm#xuc1450473442033. Überprüfungsdatum: 13.07.2020.
- [71] DASSAULT SYSTÈMES: *ScanTo3D - eine Übersicht*. URL: http://help.solidworks.com/2019/german/SolidWorks/scanto3d/c_Scanto3d_overview.htm?id=e9b9310e1de34205aec2264ec0d813c3#Pg0. Überprüfungsdatum: 03.08.2020.
- [72] 3D SYSTEMS: *Geomagic for SolidWorks®: Reverse Engineering to SolidWorks® Software*. URL: <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-solidworks>. Überprüfungsdatum: 15.04.2021.
- [73] Rieg, F.; Steinhilper, R.: *Handbuch Konstruktion*. Hanser, München, 2012, E-Book-ISBN 978-3-4464-3403-5.
- [74] IGES / PDES Organization: *Initial graphics exchange specification (IGES), IGES 5.3*. An American national standard: U.S. Product Data Association (US PRO), United States, 23.09.1996.
- [75] AUTODESK® INC.: *Autodesk App Store: Mesh Enabler*. URL: https://apps.autodesk.com/INVENTOR/en/Detail/Index?id=6950391119076900441&appLang=en&os=Win32_64. Überprüfungsdatum: 03.08.2020.
- [76] Kornprobst, P.: *CATIA V5-6 für Einsteiger: Volumenkörper, Baugruppen und Zeichnungen*. 2. Auflage, Hanser, München, 2019, ISBN 978-3-446-45532-0.
- [77] Grellmann, U.: *Einführung Inventor 2019: Von der 2D-Skizze zur 3D-Animation*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020, ISBN 978-3-658-27124-4.
- [78] Wunsch, A.; Pilz, F.: *Siemens NX für Einsteiger - kurz und bündig*. 4. Auflage 2020, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020, ISBN 978-3-658-29588-2.
- [79] Köhler, P.: *CAD-Praktikum für den Maschinen- und Anlagenbau mit PTC Creo*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016, ISBN 978-3-658-15389-2.
- [80] DASSAULT SYSTÈMES: *SolidWorks® 2020 Hilfe – Skizzenbild*. URL: http://help.solidworks.com/2020/german/SolidWorks/sldworks/c_sketch_picture.htm?verRedirect=1. Überprüfungsdatum: 16.02.2021.
- [81] THERMO FISHER SCIENTIFIC: *Avizo Software for quality control*. URL: <https://www.thermofisher.com/de/de/home/industrial/electron-microscopy/electron-microscopy-instruments-workflow-solutions/3d-visualization-analysis-software/avizo-industrial-inspection.html> - Überprüfungsdatum: 08.12.2020.

- [82] SYNOPSIS® INC.: *Simpleware ScanIP: 3D Image Segmentation and Processing Software*. URL: <https://www.synopsys.com/simpleware/software/scanip.html>. Überprüfungsdatum: 08.12.2020.
- [83] MATERIALISE: *Mimics Innovation Suite*. URL: <https://www.materialise.com/en/medical/mimics-innovation-suite>. Überprüfungsdatum: 08.12.2020.
- [84] SYNOPSIS® INC.: *Fit NURBS Patches to 3D Image Data: NURBS Patch Fitting*. URL: <https://www.synopsys.com/simpleware/software/nurbs-module.html>. Überprüfungsdatum: 14.07.2020.
- [85] SYNOPSIS® INC.: *Bringing Together CAD and Image Data with Simpleware Design Link*. URL: <https://www.synopsys.com/simpleware/news-and-events/design-link.html>. - Aktualisierungsdatum: 21.09.2020. Überprüfungsdatum: 21.10.2020.
- [86] Hofmann, D.: *Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Nutzung von CT-Daten in der Produktentwicklung am Beispiel einer historischen Taschenuhr*. Seminar ZfP 4.0 - Die ZfP im Zeichen der Digitalisierung, Frankfurt am Main, 08.10.2020, URL: <https://www.dgzfp.de/seminar/zfp-40>. Überprüfungsdatum: 23.02.2021.
- [87] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S., et al.: *Parametrische Konstruktion von CAD-Bauteilen auf CT-Daten*. In: Paul, Lothar; Stanke, Gerd; Heuwold, Niels; Pochanke, Michael (Hrsg.): 3D-NordOst 2015. Tagungsband: 18. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten: Teil des 3D-Veranstaltungs-Clusters Berlin: Berlin, 03.-04. Dezember 2015, Berlin, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V., 2015, S.145–153, ISBN 978-3-942709-14-9.
- [88] Draganov, H.: *Rekonstruktion einer beschädigten historischen Taschenuhr auf Basis von CT-Daten*. TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik/CAD, Projektarbeit zum Forschungspraktikum, 29.01.2019.
- [89] Reinhardt, J.: *ReAnimation einer Taschenuhr*. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fakultät Informatik / Mathematik, Diplomarbeit, 02.02.2015.
- [90] TÜV RHEINLAND AKADEMIE GMBH: *RT 1 - Durchstrahlungsprüfung. ZfP - zerstörungsfreie Prüfung: Ausbildung von ZfP-Personal in der Durchstrahlungsprüfung Stufe 1*. URL: <https://akademie.tuv.com/weiterbildungen/rt-1--durchstrahlungspruefung-zfp--zerstoerungsfreie-pruefung-258604>. Überprüfungsdatum: 19.10.2020.
- [91] DGZFP - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG: *RT Durchstrahlungsprüfung: Kurse und Prüfungen*. URL: <http://www.dgzfp.de/RT>. Überprüfungsdatum: 19.10.2020.
- [92] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage, Hanser, 2017, ISBN 978-3-446-44089-0.
- [93] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN, Fakultät Maschinenwesen: *Studiengang Maschinenbau (Diplom) akkreditiert: Studieninformationen und Voraussetzungen zum Studiengang Maschinenbau*. URL: https://tu-dresden.de/studium/vor-dem-studium/studienangebot/sins/sins_studiengang?autoid=291. Überprüfungsdatum: 15.04.2020.
- [94] Hacker, W.; Winkelmann, C.; Stelzer, R.: *Zur Ausbildung von Ingenieuren: Fachunspezifische Unterstützung des konstruktiven Entwerfens*. VDI-Verlag (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft 196), Düsseldorf, 2009, ISBN 978-3-18-319616-6.
- [95] VDI 2221 Blatt 1: *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Richtlinie: Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, November 2019.

- [96] Emmerich, U.: *Spritzgießwerkzeuge mit SolidWorks effektiv konstruieren*. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, ISBN 978-3-658-05062-7.
- [97] Pianykh, O. S.: *Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM): A Practical Introduction and Survival Guide*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-10849-5.
- [98] Brückner, B.: *Klassifizierung und Umsetzung von Bild- und Kantenfilteralgorithmen zur Anwendung von Schichtbilddaten in Modellierwerkzeugen*, TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik / CAD, Großer Beleg, 14.07.2018.
- [99] Dahlke, S.: *Kombinierte Visualisierung von Volumendaten und polygonalen Oberflächendaten*. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fakultät für Informatik, Masterarbeit, 27.08.2013.
- [100] Nischwitz, A.; Fischer, M.; Haberäcker, P., et al.: *Computergrafik und Bildverarbeitung – Band I: Computergrafik*. 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, ISBN 978-3-8348-1304-6.
- [101] Orlamünder, D.; Mascolus, W.: *Computergrafik und OpenGL: Eine systematische Einführung mit 26 Übungen*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München, 2004, ISBN 3-446-22837-3.
- [102] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S., et al.: Potenzial bildgebender Digitalisierverfahren im Maschinenbau, In: 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014 (KT2014), 16.-17. Oktober 2014, Bayreuth, ISBN 978-3-00-046544-4.
- [103] DIN EN ISO 5459: 2013-05: *Geometrische Produktspezifikation (GPS)*. Internationale Norm: Deutsches Institut für Normung, Berlin, Mai 2013.
- [104] Schöne, C.; Sembdner, P.; Hofmann, D.: *Reverse Engineering im Werkzeug- und Formenbau: Alternative zur klassischen 3D-Koordinatenmesstechnik*. In: VDI-Z Integrierte Produktion. Special Werkzeug-/Formenbau, November 2012, S.39–41.
- [105] Besl, P. J.; McKay, N. D.: *A method for registration of 3-D shapes*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (1992), Nr. 2, S.239–256, DOI 10.1109/34.121791.
- [106] Strutz, T.: *Data Fitting and Uncertainty: A practical introduction to weighted least squares and beyond*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011, ISBN 978-3-8348-9813-5.
- [107] DASSAULT SYSTÈMES: *Grafiknetz und BREP-Netzkörper: Darstellung und Interpretation von Polygonmodellen in SolidWorks®*. URL: http://help.solidworks.com/2020/german/SolidWorks/sld-works/c_mesh.htm?verRedirect=1. Überprüfungsdatum: 10.03.2021.
- [108] Hofmann, D.; Süß, M.; Schöne, C., et al.: *Entwicklung und Validierung von Gestaltungsvarianten geschlossener Pumpenlaufräder für pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren*. In: Krause, Dieter; Paetzold, Kristin; Wartzack, Sandro (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 29. DfX-Symposium, Tutzing, 2018, S.155–166, DOI 10.18726/2018_3.
- [109] Sembdner, P.; Kilian, D.; Hofmann, D., et al.: *Bildgebungsbasiertes individuelles Design und additive Fertigung von osteochondralen Knochenersatzstrukturen*. 2021, In: Lachmayer, Roland; Rettschlag, Katharina; Kaieler, Stefan (Hrsg.): Konstruktion für die Additive Fertigung 2020. 1. Auflage 2021, Springer Vieweg, Berlin, ISBN 978-3-662-63029-7.

- [110] Lorensen, W. E.; Cline, H. E.: *Marching Cubes: A high Resolution 3D Surface construction algorithm*. In: SIGGRAPH '87 - Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, United States, ACM, 1987, S.163-169, DOI 10.1145/37402.37422.
- [111] Paatero, Y. V.: *Pantomography in theory and use: Panoramaaufnahme*. In: Acta radiologica 41 (1954), Nr. 4, S.321–335, DOI 10.3109/00016925409175858.
- [112] ZAHNARZTPRAXIS WALDE DRESDEN: *Panoramaaufnahme Ober- und Unterkiefer: Patient Dirk Hofmann*. 2D- Röntgenaufnahme, Dresden, 2018.
- [113] Kasperl, S.; Hiller, J.: *Zum Verhältnis von Bildqualität und Messgenauigkeit in der CT-Metrologie*. In: Proceedings. Industrielle Computertomografie-Tagung 2010: Zerstörungsfreie Bauteilprüfung, 3D-Materialcharakterisierung und Geometriebestimmung; Fachtagung, 27. - 29. September 2010, FH OÖ Campus Wels / Austria; eine Veranstaltung im Rahmen des K-Projektes ZPT, Zerstörungsfreie Prüfung und Tomografie, Shaker, Aachen, 2010, ISBN 978-3-8322-9418-2.
- [114] Brückner, B.: *Entwicklung einer Vorgehensweise zur Identifikation und parametrischen Überführung von geometrischen Objekten aus CT-Daten in CAD-Umgebungen*. TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik/CAD, Diplomarbeit, 28.03.2019.
- [115] Seppke, B.; Dreschler-Fischer, L.; Wilms, C.: *A Robust Superpixel Based Segmentation for Urbanization Monitoring by Means of Spectral Remote Sensing Images*. In: Kersten, Thomas P. (Hrsg.). Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.: Dreiländertagung der SGPF, DGPF und OVG Lösungen für eine Welt im Wandel, Band 25. 36. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Bern, Schweiz, 07.-09. Juni 2016, ISSN 0942-2870.
- [116] Achanta, R.; Shaji, A.; Smith, K., et al.: *SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Jahrgang 34 (2012), Nr. 11, S.2274–2282, DOI 10.1109/TPAMI.2012.120.
- [117] Neubert, P.: *Superpixels and their Application for Visual Place Recognition in Changing Environments*. Universitätsbibliothek Chemnitz, Dissertation, Chemnitz, 2015.
- [118] Fischler, M. A.; Bolles, R. C.: *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. In: Communications of the ACM 24 (June 1981), Nr. 6, S.381–395, DOI 10.1145/358669.358692.
- [119] Hartley, R., Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd Edition, Cambridge University Press, 2003, ISBN 9780521540513.
- [120] Otsu, N.: *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 9 (1979), Nr. 1, S.62–66, DOI 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [121] INTEL® SOFTWARE NETWORK: *ComputeThreshold_Otsu*, URL: <https://software.intel.com/en-us/ipp-dev-reference-computethreshold-otsu>. Überprüfungsdatum: 15.07.2020.
- [122] Newman, T. S.; Yi, H.: *A survey of the marching cubes algorithm*. In: *Computers & Graphics* volume 30 (2006), Nr. 5, S.854–879, DOI 10.1016/j.cag.2006.07.021.
- [123] Jahns, M.: *Wie lässt sich voxelbasierte 3D-Umgebung polygonisieren?*. Fachbereich Mathematik und Informatik, Freie Universität Berlin, Bachelorarbeit, 10.03.2014.

- [124] Chernyaev, E. V.: *Marching Cubes 33: Construction of Topologically Correct Isosurfaces*. In: *Graphicon'95, Computing and Networks Division - Verlag CERN, St. Petersburg, Russland, 03.-07. July 1995*.
- [125] Lewiner, T.; Lopes, H.; Vieira, A. W., et al.: *Efficient Implementation of Marching Cubes' Cases with Topological Guarantees*. In: *Journal of Graphics Tools 8 (2003), Nr. 2, S.1–15, DOI 10.1080/10867651.2003.10487582*.
- [126] Kobbelt, L. P.; Botsch, M.; Schwanecke, U., et al.: *Feature sensitive surface extraction from volume data*. In: *Pocock, Lynn (Hrsg.): SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, S.57–66, 2001, DOI 10.1145/383259.383265*.
- [127] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S., et al.: *Direct design of an individual bone implant on patient-specific CT data in CAx Systems*. In: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS) - Proceedings of the 32nd International Congress and Exhibition, Volume 13, Supplement 1, S.238-239; 20.-23. Juni 2018, Berlin, Deutschland, ISSN: 1861-6410 (gedruckt), ISSN: 1861-6429 (digitale Version)*.
- [128] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S., et al.: *Approach for using CT data in product development processes*. 8th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2018), Wels, Österreich, 06.-09. Februar 2018, URL: www.ndt.net, Issue 2018-02, Vol.23 No.02 (Feb 2018), The e-Journal of Nondestructive Testing, ISSN 1435-4934.
- [129] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S., et al.: *Direkte Nutzung von CT-Daten zur Konstruktion individueller freigeformter Implantate im CAD-System*. In: *Rieg, Kleinschrodt (Hrsg.) 2019 – Tagungsband: 21. Bayreuth 3D-Konstrukteurstag, Bayreuth, 18. September 2019, ISBN 978-3-00-062532-9, ISSN 2510-6686*.
- [130] Klein, P.; Tietjen, T.; Scheuermann, G.: *Inventor 2019: Grundlagen und Methodik in zahlreichen Konstruktionsbeispielen*. 6. Auflage, München, Hanser, 2018, ISBN 978-3-446-45513-9.
- [131] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik/CAD: *Angebot, Einrichtungen und Ausstattung. Software*, URL: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm/ktc/die-professur/angebote_einrichtungen_ausstattung/index#ck_Software. Überprüfungsdatum: 15.07.2020.
- [132] Kirillov, A.: *AForge.NET Framework*. URL: <http://www.aforgenet.com/>. Überprüfungsdatum: 08.12.2020.
- [133] Voigt, J.: *Entwicklung einer Prozesskette zur Konstruktion patientenindividueller Schädelimplantate auf Basis von CT-Daten*, TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik / CAD, Diplomarbeit, 20.04.2020.
- [134] Schünke, M.; Schulte, E.; Schumacher, U., et al.: *Prometheus Lernatlas - Kopf, Hals und Neuroanatomie*. 5. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart, 2018, ISBN 9783132420915.
- [135] Schiffner, S.: *Entwicklung von Konstruktionsprinzipien für individuelle Hybridimplantate*. TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik / CAD, Diplomarbeit, 12.04.2019.
- [136] Scheibner, B.: *Konstruktion, Fertigung und Evaluierung hybrider Implantate*, TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik/CAD, Diplomarbeit, 28.03.2021.
- [137] Zacher, R.: *Aufstellen eines Prozesses zur Konstruktion von Individualimplantaten unter Beachtung regulatorischer Aspekte*, TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik / CAD, Diplomarbeit, 20.05.2019.

- [138] MDR (EU) 2017/745: *Medical Device Regulation - Medizinprodukteverordnung der EU*. EU Verordnung, Inkrafttreten: 05.04.2017.
- [139] STAATLICHE KUNSTSAMMLUNGEN DRESDEN - YouTube Kanal: *Seyfferts Chronometer No. 8*, Video, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pfwiqHN2jak&feature=youtu.be>. Überprüfungsdatum: 17.07.2020, 2016.
- [140] Beck, A.: *Das Bild der Woche: Werk einer Taschenuhr von Johann Heinrich Seyffert, Dresden, 1811*. In: Die Uhrmacher-Woche, Jahrgang 48 (1941), Ausgabe Nr. 25, S.25-27, Dresden, 1941.
- [141] Pfeiffer-Belli, C.; Meis, R.: *A. Lange & Söhne: Eine Uhrmacher-Dynastie aus Dresden*. Callwey Verlag, S.18-37, München, 1997, ISBN 978-3766712868.
- [142] STAATLICHE KUNSTSAMMLUNGEN DRESDEN - MATHEMATISCH PHYSIKALISCHER SALON: *CT-Datensatz Taschenuhr N°8 von J.H. Seyffert: InvNr. D IV a 096*. CT-Datensatz, 2019.
- [143] Martínek, Z.; Řehoř, J.; Koch, R.: *Mechanische Uhren*. 9. Auflage, Verlag Technik, Berlin, 1996, ISBN 978-3341011560.
- [144] Scheuermann, G.: *Simulationen mit Inventor - FEM und dynamische Simulation: Grundlagen und Beispiele ab Version 2017*. Hanser, München, 2016, ISBN 978-3-446-45012-7.
- [145] Brand, M.: *FEM-Praxis mit SolidWorks: Simulation durch Kontrollrechnung und Messung verifizieren*. 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016, ISBN 978-3-658-09386-0.
- [146] Vajna, S.; Achatzi, A.: *Creo Parametric 6.0 für Fortgeschrittene - kurz und bündig: Grundlagen mit Übungen*. 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019, ISBN 978-3-658-27877-9.
- [147] d'Argent, D.: *Entwicklung eines Konzeptes zur Überführung unterschiedlicher Geometrieformen aus CT-Daten in CAE-Anwendungen*, TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik / CAD, Diplomarbeit, 01.03.2021.
- [148] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Holtzhausen, S., et al.: *A Proposal for Digital Imaging and Communication in Product Engineering Using CT Data*. In: Volume 4: 24th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 13th International Conference on Micro- and Nanosystems, American Society of Mechanical Engineers (ASME), Anaheim, Kalifornien, United States, 18.-21. August 2019, ISBN 978-0-7918-5922-3, DOI 10.1115/DETC2019-97355.
- [149] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Richter, M., et al.: *Entwicklung und Umsetzung einer Schnittstelle zur QM-basierten Anwendung von CT-Daten im CAD-System am Beispiel metallpulverbasierter additiver Fertigungsverfahren*. In: DACH-Jahrestagung 2019, 27.-29. Mai 2019, Friedrichshafen, DGZfP, ISBN 978-3-947971-02-2.
- [150] Holtzhausen, S.; Sembdner, P.; Hofmann, D., et al.: *Verfahren zur Ermittlung von Daten an Bauteilen oder biologischen Objekten und Strukturen für einen Bereich, in dem kein Bauteilwerkstoff oder biologisches Material mehr vorhanden ist, oder der Bereich Defekte aufweist*. TU Dresden, Patentanmeldung. Veröffentlichungsnummer DE 10 2014 217 586 A1, Dresden, Deutschland, 03.03.2016.
- [151] Hofmann, D.; Sembdner, P.; Lindemann, J., et al.: *Erzeugung und Nutzung von Schichtbilddaten aus CAD-Modellen*. In: 3D-NordOst 2016 - 19. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten: Teil des 3D-Veranstaltungs-Clusters Berlin: Berlin 01.-02. Dezember 2016, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI), Berlin, ISBN 978-3-942709-16-3.

- [152] Pendzig, M.; Hofmann, D.; Holtzhausen, S.; GFal: *Rauheitsbestimmung anhand von Schichtbildern in der CAD-Umgebung*. In: 3D-NordOst 2019 - 22. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, Gesellschaft z. Förderung angewandter Informatik (GFal), 05.-06. Dezember 2019, ISBN 978-3-942709-24-8.
- [153] Hilbig, A.; Holtzhausen, S.; Stelzer, R.: *Regelgeometriedetektion in der Flächenrückführung mittels Deep Learning basierter Prozessierung von diskreten Daten*. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2019): Agile Entwicklung physischer Produkte, RWTH Aachen University, S.102-111, 01.-02. Oktober 2019, Aachen, DOI 10.18154/RWTH-2019-08298.
- [154] Fuchs, P.; Kröger, T.; Garbe, C. S.: *Self-supervised Learning for Pore Detection in CT-Scans of Cast Aluminum Parts*. In: Proceeding of the international symposium on digital industrial radiology and computed tomography DIR2019, Jahrgang / Band 264, 02.-04. July 2019, Fürth.
- [155] Mayer, H. O.; Treichel, D.: *Handlungsorientiertes Lernen und eLearning: Grundlagen und Praxisbeispiele*. Oldenbourg Schulbuchverlag, München, 2004, ISBN 3-486-20021-6.
- [156] Neumann, J.: *Vergleich und Validierung der Methode der direkten Konstruktion auf CT-Daten mit konventionellen Methoden zum Implantat-Design*. TU Dresden, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Professur für Konstruktionstechnik / CAD, Projektarbeit zum Forschungspraktikum, 31.03.2019.
- [157] MATERIALISE MEDICAL: *Tutorial Videos - Materialise Mimics Innovation Suite*. Video, URL: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLgKupGzqNjdYYwpQ6cWO7At90f5EGI01m>. Überprüfungsdatum: 16.07.2020.
- [158] MATERIALISE MEDICAL: *How to Design an Patient-Specific Cranical Plate - Mimics Innovation Suite*: Materialise Medical. Video, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=23WZPI11HvE&list=PLgKupGzqNjdYYwpQ6cWO7At90f5EGI01m&index=24&t=0s>. Überprüfungsdatum: 16.07.2020, 2018.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Prozesskette zur Modellerstellung aus CT-Daten am Beispiel eines Unterkieferknochens	2
Abbildung 1-2:	Prozesskette mit ausgewählten Beispielen der einzelnen Bestandteile	3
Abbildung 1-3:	Aufbau und Inhalte der Arbeit	5
Abbildung 2-1:	Aufbau eines 3D-iCT - Objekterfassung (links), Schichtbildentstehung (rechts).....	6
Abbildung 2-2:	Computertomographische Daten und ihre Eigenschaften	7
Abbildung 2-3:	Einzelne Schicht einer Schichtbildsequenz mit beispielhafter Struktur der Metadaten	9
Abbildung 2-4:	Klassifikation und beispielhafte Auswahl von Einflussgrößen auf das Abbildungsergebnis.....	10
Abbildung 2-5:	Schichtbilder eines industriellen (links) und eines medizinischen (rechts) computertomographischen Datensatzes mit Artefakten	10
Abbildung 2-6:	Darstellung eines menschlichen Schädels aus drei kartesischen Koordinatenebenen in anatomischer Schnitfführung	11
Abbildung 2-7:	Indirekte und direkte Visualisierungsformen computertomographischer Daten	11
Abbildung 2-8:	Prozessketten zur Darstellung der Repräsentationsformen und Datenformate	13
Abbildung 2-9:	Vernetztes Polygonmodell eines Unterkieferknochens mit Detaillierung der Struktur.....	14
Abbildung 2-10:	Prinzip einer regionenbasierten Segmentierung - Eingrenzen einer fiktiven Region und Setzen eines Saatpunktes (links), Pixel mit den gleichen Eigenschaften einer Region werden gesucht (rechts).	15
Abbildung 2-11:	Computertomogramm einer Taschenuhr (links) - Messen eines Winkels (rechts oben) und eines Abstandes (rechts unten)	17
Abbildung 2-12:	Schichtbild eines Schädels mit kreisförmiger <i>Region of Interest</i> (links), <i>Bounding Box</i> der Schichtbildsequenz eines Taschenuhrwerkes (rechts).....	18
Abbildung 2-13:	Histogramm-Analyse eines Radträgers mit Auszug einer Schichtbildsequenz aus dem Voxelvolumen, Aufnahme mit VOLUME GRAPHICS MAX 3.3.2.....	19
Abbildung 2-14:	Modellierungsvarianten computertomographischer Repräsentationsformen in CAD-Systemen.....	21
Abbildung 2-15:	Erstellung eines analytischen Volumenmodells aus einem Polygonmodell	22
Abbildung 2-16:	Phasen der Flächenrückführung am Beispiel eines Unterkieferknochenmodells...	23
Abbildung 2-17:	Prinzip der direkten Modellierung: 1. Markieren, 2. Ziehen oder Drehen, 3. Bestätigen und Beenden.....	25
Abbildung 2-18:	Systematische Vorgehensweise einer parametrischen Modellierung	26
Abbildung 2-19:	Konturverfolgung im CAD-System SOLIDWORKS® (Version 2020) am Beispiel einer CT-Schichtbildsequenz - Gesamtübersicht (Abbildung a-d verkleinert): (a) Initiieren der Verfolgung durch Selektieren der Region, (b) Ergebnis Konturverfolgung, (c) vollständige Skizzengeometrie, (d) dreidimensionales Bauteil (Isometrische Ansicht).....	27

Abbildung 2-20:	Funktionsumfang getesteter Systeme in den Schrittfolgen der Prozesskette	28
Abbildung 2-21:	Flächenvariation bei der NURBS-Erstellung mit SIMPLEWARE®	30
Abbildung 2-22:	Vergrößerter Ausschnitt einer Schichtbildsequenz der Schnecken-Baugruppe - Grauwertbild als Ansicht von unten (links), Anwendung der Kantenerkennung mit einem CANNY-Operator (mitte), Partiiell rekonstruiertes CAD-Modell (rechts)...	32
Abbildung 2-23:	Minutenrad-Baugruppe als einzelnes Objekt mit Aussparungen (links) und vollständig rekonstruiert (rechts)	32
Abbildung 2-24:	Erfassen der Parameter des Minutenradtriebes über Messfunktionen (links), Rekonstruiertes Volumenmodell (rechts)	33
Abbildung 2-25:	Direkte Modellierung auf Bilddaten am Beispiel des Gangrades.....	33
Abbildung 3-1:	Exemplarisch gegebene Einflussfaktoren auf den Prozess.....	36
Abbildung 3-2:	Interaktion computertomographischer und CAD-spezifischer Prozessebenen	40
Abbildung 3-3:	Bestandteile der computertomographischen Datenvorbereitung.....	41
Abbildung 3-4:	Schematische Darstellung der Datenüberführung und Interpretation.....	42
Abbildung 3-5:	Prinzip der Kommunikations- und Interaktionsebene	43
Abbildung 3-6:	Auswahl und Initialisierung der CT-Daten.....	44
Abbildung 3-7:	Kombinierte Visualisierung aller aus dem Voxelvolumen generierbaren Formen ..	45
Abbildung 3-8:	Funktionsprinzip des RAYCASTING	45
Abbildung 3-9:	Bezeichnung und Zusammenhänge der Koordinatensysteme	46
Abbildung 3-10:	Initiale Ausrichtung am Beispiel eines Rohres - Zustand nach Erfassung	47
Abbildung 3-11:	Initiale Ausrichtung am Beispiel eines Rohres - Ausgerichteter Zustand	48
Abbildung 3-12:	Beispielhafte Anwendung des RPS-Bezugssystems.....	49
Abbildung 3-13:	Registrierung mittels ICP-Algorithmus am Beispiel eines Radträgers.....	51
Abbildung 3-14:	Eingrenzung der Schichtbildsequenz durch definierte Vorauswahl.....	52
Abbildung 3-15:	Objektkonstellation einer Schichtbildsequenz nach der Erfassung	53
Abbildung 3-16:	Volumenreduktion durch Eingrenzung auf wesentliche Objektinformationen	53
Abbildung 3-17:	Eingrenzung einer dreidimensionalen Struktur mit Hilfe einer Bounding Box	54
Abbildung 3-18:	Festlegen eines Schnittbereiches über eine Referenzebene	55
Abbildung 3-19:	Markieren des Unterkieferbereiches über einen Spline	56
Abbildung 3-20:	Übertragung eines Schichtbildes aus der CT-Umgebung in die CAD-Um- gebung am Beispiel von SOLIDWORKS® 2020	58
Abbildung 3-21:	Abbildung räumlicher Eigenschaften von Schichtbildsequenzen in CAD- Umgebungen.....	59
Abbildung 3-22:	Abfrage und Antwort innerhalb der Kommunikations- und Interaktionsebene	62
Abbildung 3-23:	Schichtbildbezeichnung - Technische (links), Medizinische (rechts).....	64
Abbildung 3-24:	Erstellung ergänzender Schichtbildansichten aus der CAD-Umgebung	65
Abbildung 3-25:	Erzeugen eines beliebigen Schnittbildes über trilineare Interpolationen	66
Abbildung 3-26:	Erstellung eines beliebigen Schnittbildes am Beispiel.....	67
Abbildung 3-27:	Panoramaschichtaufnahme eines Ober- und Unterkiefers.....	67

Abbildung 3-28:	Schematische Vorgehensweise zur Erstellung einer Panoramaansicht	68
Abbildung 3-29:	Erzeugung eines Freiformschnittes zur Analyse einer Lötverbindung - Definition der Bereichsgrenzen (links), Freiformschnittansicht (rechts).....	69
Abbildung 3-30:	Methodisches Prinzip zur Kontur- und Geometrieableitung	70
Abbildung 3-31:	Exemplarische Vorgehensweise zur Beeinflussung der Abbildungs- eigenschaften	72
Abbildung 3-32:	Parametereinfluss auf die Anwendung der Superpixel in einem Schädel-CT	73
Abbildung 3-33:	Schrittfolge zur Auswahl und Eingrenzung eines Objektbereiches	74
Abbildung 3-34:	Erkennung einer Geraden mit dem RANSAC-Algorithmus - eine Wiederholung (links), zwei Wiederholungen (rechts)	75
Abbildung 3-35:	Definition zusammengesetzter Geometrien durch Segmentation	76
Abbildung 3-36:	Nasennebenhöhlen-CT - Kontur- und Geometrieableitung	77
Abbildung 3-37:	Allgemeine methodische Prozesskette zur Erstellung partieller Oberflächen- modelle	78
Abbildung 3-38:	Schwellwertbestimmung nach OTSU: (a) Ausgangsbild, (b) Histogramm mit ermittelten Schwellwert, (c) Ergebnisbild nach Anwendung des Schwellwertes	79
Abbildung 3-39:	Funktionsweise des MARCHING CUBES ALGORITHMUS am Beispiel eines Voxels	79
Abbildung 3-40:	Voxelkombinationen, die beim MARCHING CUBES ALGORITHMUS unterschieden werden.....	80
Abbildung 3-41:	Möglichkeiten der Triangulation bei interner Mehrdeutigkeit am MC-Fall 4	81
Abbildung 3-42:	Flächenstücke, in denen (a) ein möglicher Feature-Punkt ausgewählt wurde, (b) zusätzlich generierte Feature-Punkte, (c) Resultierende Kante nach der Drehung	82
Abbildung 3-43:	Vergleich unterschiedlicher Vernetzungsarten eines Polygonmodells - (a) MARCHING CUBES Standardverfahren, (b) Erweiterter MARCHING CUBES mit optimierter Netzstruktur	82
Abbildung 3-44:	Erstellung eines lokalen Oberflächenmodells zur besseren Gestaltung der Anbindungsbereiche bei der Konstruktion eines Unterkieferimplantats	83
Abbildung 4-1:	Optionen zur Erstellung nutzerspezifischer Anwendungen von CAD-Systemen.....	85
Abbildung 4-2:	Programmtechnische Umsetzung der Systemumgebung CTINA	88
Abbildung 4-3:	Aufbau und Bestandteile der Systemumgebung CTINA (Version 1.4.7).....	88
Abbildung 4-4:	Aufbau des Hirnschädels - Querschnitt mit anliegenden Geweben und Gefäßen	90
Abbildung 4-5:	Verschiedene Ansichten eines Polygonmodells des Patienten-Datensatzes mit Kennzeichnung der provisorischen Defektdeckung	91
Abbildung 4-6:	Import und initiale Ausrichtung sowie Eingrenzung auf den Schädelbereich	92
Abbildung 4-7:	Erstellung von Referenzen in Form beliebiger Schnittbilder	93
Abbildung 4-8:	Auswahl und Übergabe der Schnittbild-Repräsentationen an die CAD- Umgebung.....	94
Abbildung 4-9:	Konturableitung des korrespondierenden Defektbereiches der unversehrten Seite	94

Abbildung 4-10:	Übertragung der Kontursilhouette auf das äquivalente Schnittbild des Defektbereiches	95
Abbildung 4-11:	Verschiedene Ansichten des dreidimensionalen Implantat-Rohlings	95
Abbildung 4-12:	Verschiedene Frontalansichten des provisorischen Schädelknochenimplantats ...	96
Abbildung 4-13:	Ausgewählte Interaktionen der Modellierung	97
Abbildung 4-14:	Unterschiedliche Ansichten des individuellen Hybridimplantates	98
Abbildung 4-15:	Taschenuhr Chronometer Nr. 8 - Vorderseite (links), Rückseite offen (rechts)....	100
Abbildung 4-16:	Räderwerk des Chronometers Nr. 8 mit zusätzlicher Abbildung des Energiespeichers und der Schnecke	101
Abbildung 4-17:	Analyse der Ausgangsbedingungen: Volumenvisualisierung (links), einzelne Schichtbildsequenz (rechts)	102
Abbildung 4-18:	Isometrische Ansicht des CT- und CAD-Datensatzes mit einer Auswahl korrespondierender Referenzen	103
Abbildung 4-19:	Erstellen eines Volumenmodells aus der Skizzengeometrie	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Gegenüberstellung der Visualisierungsformen computertomographischer Daten	12
Tabelle 2-2:	Verfahren der Bildanalyse und zugehörige Ergebnisse	19
Tabelle 2-3:	Übersicht ausgewählter proprietärer Systeme zur Verarbeitung von CT-Daten	29
Tabelle 2-4:	Vergleich aktueller Prozessketten mit ihren Vor- und Nachteilen	31
Tabelle 3-1:	Bestandteile der Struktur von CT-Daten und deren Eigenschaften	38
Tabelle 3-2:	Übersicht zu Objekteigenschaften, die aus CT-Datenstrukturen ableitbar sind	38
Tabelle 3-3:	Kriterien bei Registrierungsverfahren mit Anforderungen dieser Prozesskette	50
Tabelle 3-4:	Übersicht und Eigenschaften objektbestimmender Referenzen	55
Tabelle 3-5:	Übertragung und Interpretation von Repräsentationsformen an die CAD-Umgebung am Beispiel von SOLIDWORKS® (Auszug)	60
Tabelle 3-6:	Objektbezogene Referenzen und deren Interpretation im CAD-System	61
Tabelle 3-7:	Allgemeine geometrische Grundabfragen computertomographischer Eigenschaften	62
Tabelle 3-8:	Erweiterte Grundabfragen	63
Tabelle 3-9:	Abgeleitete Abfrageformen zur Bildung einer Übertragungsform (exemplarisch).....	64
Tabelle 3-10:	Parameter des SLIC-Algorithmus	73
Tabelle 4-1:	Technische Umsetzungsmöglichkeiten des Konzeptes	86
Tabelle 4-2:	Eigenschaften der verwendeten Hard- und Software sowie des vorliegenden Datensatzes	89
Tabelle 4-3:	Technische Voraussetzungen der verwendeten Software bei der Taschenuhr	100
Tabelle 4-4:	Schritte zur Modellierung des Minutenrades (Auszug).....	104
Tabelle 4-5:	Bearbeitungsschritte und Zeitaufwand der Prozesskette aus Abschnitt 1.2	106
Tabelle 4-6:	Bearbeitungsschritte und Zeitaufwand der entwickelten Prozesskette	107
Tabelle 4-7:	Bearbeitungsschritte zur Anpassung des Räderwerkes über die Methoden der Bildanalyse.....	108
Tabelle 4-8:	Abfolge zur Anpassung des Räderwerkes anhand der entwickelten Prozesskette ..	108

Anlagen

A.1 Funktionsbausteine der prototypischen Anwendung CTinA (Version 1.4.7)

Ansicht (Abbildung A.1-1): Die wichtigsten Elemente dieses Programmbausteins sind das Bildstapelkoordinatensystem, die Anzeige der *Bounding Box* mit Begrenzung auf den Bildstapel und verschiedene technische Variationen der Visualisierung. Über das Element *Motion* besteht die Möglichkeit, einzelne Schnittbilder winkelabhängig darzustellen. Zudem kann die Orientierung variiert werden.



Abbildung A.1-1: Menüpunkt Ansicht

Allgemein (Abbildung A.1-2): Dieser Baustein ist mit dem Menüpunkt *Datei* aus etablierten Software-Anwendungen gleichzusetzen. Er beinhaltet mit der Auswahl, dem Transfer von Schichtbilddaten, oberflächenbasierten Modelldaten (STL-Format) sowie Geometrien grundlegende Funktionen. Beim Abspeichern von Schichtbilddaten wird eine Projektdatei (KTCDMS) auf Basis der beschriebenen Datenstruktur erstellt, um einzelne Bearbeitungsstände zu sichern. Darüber hinaus können bereits verfügbare Projekte geöffnet und gespeichert werden.

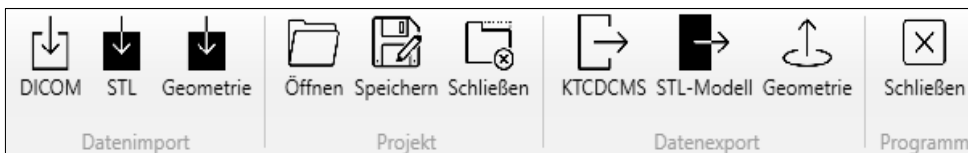


Abbildung A.1-2: Menüpunkt Allgemein

Segmentierung (Abbildung A.1-3): Der Menüpunkt *Segmentierung* beschreibt eine Auswahl der Methoden, die im Abschnitt 3.5.4 und 3.5.5 erläutert wurden. Dazu zählen eine Anwendung von Werkzeugen zur Verbesserung der Bildqualität, die Selektion von Bereichen mit der Superpixelmethode und die Werkzeuge zur Definition bestimmter Geometrieformen.



Abbildung A.1-3: Menüpunkt Segmentierung

Mit der **Ausrichtung** (Abbildung A.1-4) stehen verschiedene Funktionen zur Erstellung definierter Ausrichtungen und zur Registrierung zur Verfügung. Das sind in Abhängigkeit der Aufgabenstellung und der Datenverfügbarkeit deterministische, also Feature-basierte sowie stochastische und somit objektbasierte Verfahren (Abschnitt 3.3.2). Unabhängig davon besteht die Möglichkeit, bereits vorhandene Transformationen und fixierte Orientierungen auf die jeweilige Schichtbildsequenz oder verschiedene Objekte anzuwenden.

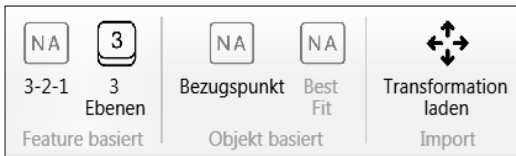


Abbildung A.1-4: Menüpunkt Ausrichtung

Bearbeiten (Abbildung A.1-5) bietet Funktionen zur Erstellung von Referenzen und potenzieller Repräsentationsformen. Dazu zählen unter anderem das Setzen von Punkten, Linien, Kreisen (Abschnitt 3.3.3) sowie die Darstellung zusätzlicher Ansichten und Schnitte aus dem Voxelvolumen (Abschnitt 3.5.2 / 3.5.3). Diese können über unterschiedliche Muster- und Spiegelfunktionen symmetrisch gerastert werden. Zudem kann durch die Erstellung einer Region of Interest der Betrachtungsbereich (Abschnitt 3.3.3) systematisch eingegrenzt werden. Darüber hinaus stehen bildanalytische Messfunktionen zur Abstands- und Winkelbestimmung zur Verfügung.

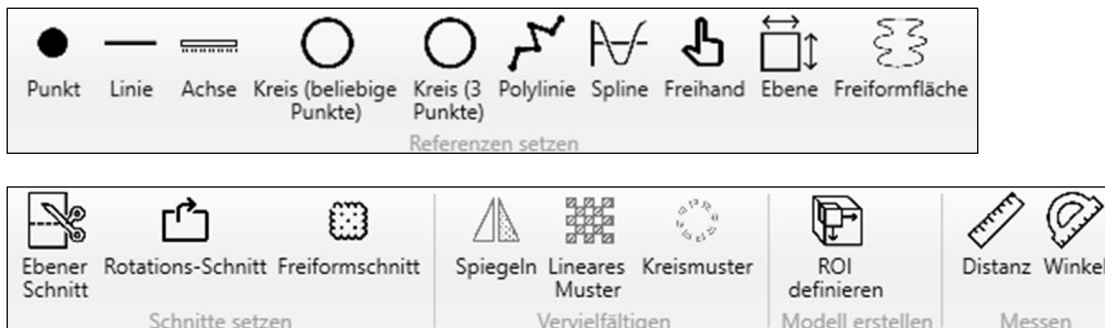


Abbildung A.1-5: Menüpunkt Bearbeiten

Netze / Kurven (Abbildung A.1-6): Unter diesem Menüpunkt werden vielfältige Funktionen zur Oberflächen- und Netzbearbeitung (Abschnitt 2.2.2) zusammengefasst. Häufig angewandte Methoden sind die Reduktion und das Glätten von Netzstrukturen sowie die systematische Neuvernetzung.

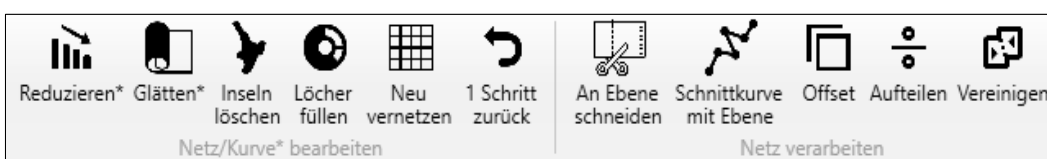


Abbildung A.1-6: Menüpunkt Netze / Kurven

Die Schnittstelle **CAD** (Abbildung A.1-7) stellt die notwendigen Funktionen zur Interaktion mit der CAD-Umgebung zur Verfügung. Sie erzeugen eine Verbindung zum angewandten CAD-System und realisieren die bidirektionale Übertragung von Geometrien sowie Bild- und Oberflächendaten. Prototypisch integriert sind die etablierten CAD-Systeme SOLIDWORKS® und AUTODESK® INVENTOR®.



Abbildung A.1-7: Menüpunkt CAD

CTinA enthält unter dem Menüpunkt **Dokumentation** auch diverse Funktionen zur Erstellung von Protokollen, Vorlagen und Möglichkeiten zum Ergänzen von Kommentaren. Abschließend sind unter dem Menüpunkt **Info** ausgewählte Hinweise zur Bedienung sowie Anhänge mit Verweisen auf entsprechende Software-Bibliotheken enthalten.

A.2 Analyse medizinischer Strategien

Anhand der nachfolgenden exemplarischen Gliederung sollen verschiedene Strategien zur Erstellung eines Gesichtsschädel-Implantats aufgezeigt werden. Es existieren drei grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen, die in Abhängigkeit von Art und Umfang des vorgegebenen medizinischen Defekts individuell einsetzbar sind.

Alle Verfahren beeinflussen in Methodik und Abfolge konsekutiv die definierte traumatologisch-rekonstruktive Therapie des zugrundeliegenden Defekts, so dass die individuell ausgewählte Strategie als Bindeglied computergenerierter und medizinischer Therapieplanung angesehen werden kann.

1) Spiegelung der unversehrten Seite - Anwendung Boolescher Operationen mit Hilfe diskreter Oberflächenmodelle [18, 156, 157]

Kurzbeschreibung: Der Schädel wird in zwei Teile unterteilt: einen unversehrten und einen traumatisch defekten Bereich. Es erfolgt die Erstellung einer Symmetrieebene. Die unversehrte Seite wird als Referenz genutzt und über die Spiegelebene auf der Defektseite abgebildet. Anschließend können zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden, um einen Formschluss zu erhalten:

- Vereinigung mit den vorhandenen Daten auf der Defektseite
- Negation (Bereinigung) der doppelten Daten

Vorteil: Schnelle / zielführende Methode zum Formschluss des defekten Areal

Nachteile:

- Ausgangsbasis liegt als Oberflächenmodell vor - Daten- und Informationsverluste ergeben sich durch Extraktion des Modells aus den Volumendaten
- Hoher manueller und zeitlicher Aufwand durch Ausgleich und Entfernung von Überlappungen und bezugsloser gestreuter Punkte
- Potenzielle Fehlerrisiken durch Löschen informativ essenzieller Oberflächen- und Strukturbereiche

Anmerkung: In der CAD-Umgebung gibt es Funktionen zur Anwendung Boolescher Operationen. Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen der Ausgangsdaten als analytische Modellbeschreibung.

Exemplarische Darstellung der Methode mit Variante a:



Spiegelebene erstellen

Unversehrte Hälfte spiegeln

Vereinigung mit Defekthälfte

2) Erstellung einer Randkontur / eines Randgurtes am Schädelinnen- und Außenbereich und anschließende Verbindung über Leitkurven [156, 157]

Kurzbeschreibung: Primär erfolgt die Erstellung einer definierten und geschlossenen Kontur um den präformierten Defektbereich. Danach werden vertikale und horizontale Leitkurven innerhalb der Kontur erstellt, die nachfolgend krümmungsstetig und fortlaufend an die äußere Form des Schädelknochens angepasst werden. Diese Leitkurven sind zur Erstellung einer geschlossenen Oberfläche strukturell verdichtet.

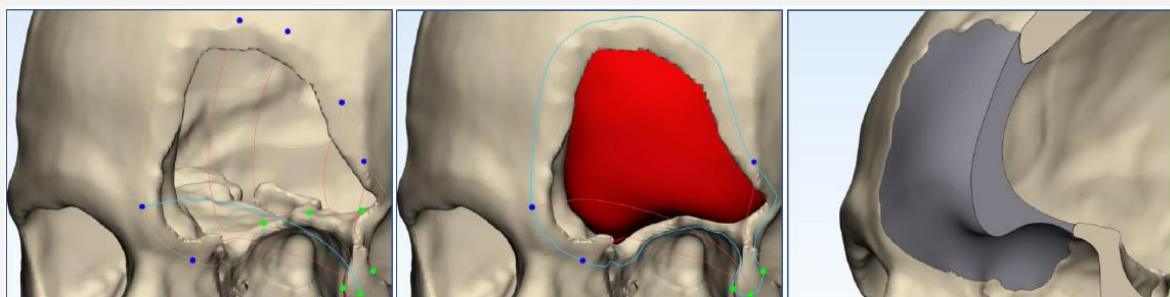
Vorteil: Methode kann mit den bekannten Funktionen eines CAD-Systems durchgeführt werden

Nachteile:

- Keine ausreichende Möglichkeit zur Prüfung einer Stetigkeit im CAD-System (z.B. Soll-Ist-Abweichungsanalyse)
- Bei individuell inhomogenem anatomischen Verlauf der Defektgrenzen ist eine hohe manuelle Präzision bei der Generierung der Leitkurven erforderlich
- Der Schädelknochen besteht bezüglich seiner Oberfläche aus einem Innen- und einen Außenteil → Nach Erstellung einer geometrisch limitierten Schnittansicht muss somit die Randkonturbildung auf beiden Seiten angewendet werden
- Sehr aufwändiger Prozess mit hohem zeitlichem Aufwand

Anmerkung: Die Erstellung einer individuellen Randkontur ist methodisch trotz des hohen Aufwandes bei kontinuierlich umschriebenen oder ausgedehnten traumatischen Knochendefekten gut geeignet.

Exemplarische Darstellung:



Erstellung der Randkontur

Verbinden über Leitkurven

Geschlossener Bereich

3) Erstellung mehrerer Schnittkonturen [156–158]

Kurzbeschreibung:

Es werden über den Schädel mehrere Schnittebenen erstellt, aus denen entsprechend äquivalente Schnittkonturen abgeleitet werden. Diese werden genutzt, um den defekten Bereich zu schließen. Dabei können zwei grundlegende Vorgehensweisen unterschieden werden:

- Horizontal (Transversalebene): Verbindung zwischen unversehrter und defekter Seite / Abbildung einer Begrenzung zur Augenhöhle
- Vertikal (Saggitalebene): Erstellung von Schnittkonturen über dem defekten Bereich → Abgrenzung vom unteren Bereich der Augenhöhle (Orbitaboden) durch Erstellung von Schnittkonturen auf der unversehrten Seite mit anschließender Spiegelung auf den Defektbereich
- Grundsätzlich ist eine Kombination beider Vorgehensweisen möglich

Vorteil:

Dieses Verfahren ist auch bei diskontinuierlicher Defektbegrenzung und somit multivariabel einsetzbar.

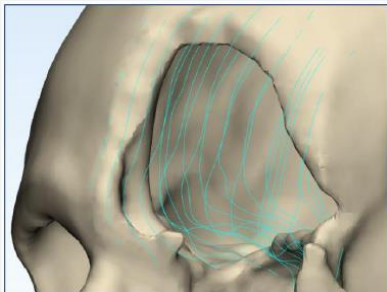
Nachteil:

In Abhängigkeit von der Anzahl der Schnittebenen kann diese Vorgehensweise sehr aufwändig sein.

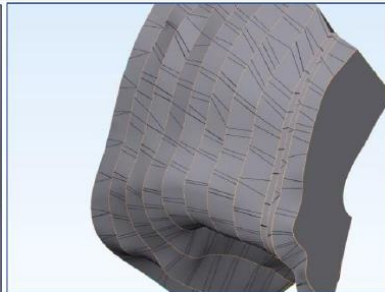
Anmerkung:

Dieser Weg wird von der Systematik und den Funktionen des CAD-Systems sehr gut unterstützt.

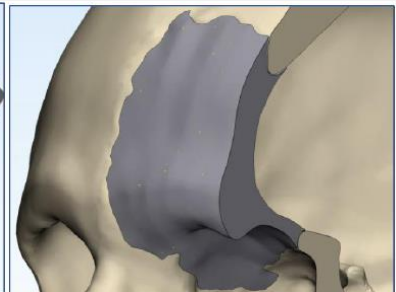
Exemplarische Darstellung anhand der vertikalen Methode:



Schnittkonturen ableiten



Implantat erstellen



Implantat einpassen

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die dargestellten Verfahrensweisen methodisch miteinander zu kombinieren. Beispielsweise sind Spiegelungen kompletter Hälften mit detaillierter Erstellung von Randkonturen variabel kombinierbar [158]. Ebenso ist eine Synthese aus der Erstellung von Schnittebenen und Randkonturen technisch realisierbar [136].

A.3 Anforderungen an die Gestaltung von Schädelimplantaten

Tabelle A.3-1: Anforderungen an die Gestaltung von Schädelimplantaten (Auszug)
[135, 137, 138]

Art der Anforderung	Beschreibung
Medizinische	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomische und biokompatible Anforderungen wie die Beachtung der Einpassung und der biologischen Transplantatintegration (Einwachsverhaltens) • Sterilisierbarkeit des Transplantats • Stimulation der Knochenregeneration • Operabilität - Zugänglichkeit der Implantationsregion • Passgerechte Transplantatmontage • Handhabung und Montage durch ärztliches Personal • Einfache Fixierung am angrenzenden Knochengewebe • Möglichkeit zur intraoperativen Bearbeitung • Röntgenopazität • Zugang bei Wundkontrollen im Zuge der Nachsorge oder bei Revisionen • Berücksichtigung kosmetisch-ästhetischer Aspekte • Prävention postoperativer bakterieller Besiedelung
Funktion / Design / Ergonomie	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomisch angepasste Formgenauigkeit • Exakte Defektüberbrückung • Biomechanische Stabilität • Sicherstellung erforderlicher Bewegungsfreiheit • Integration von intraossären Blutgefäßen und Nervenverläufen • Beachtung der ossären Biodynamik • Ableitung von Wundflüssigkeit • Verhinderung von Wärmeleitfähigkeit • Kälte- und Hitzebeständigkeit • Auswahl einer geeigneten Verbindung zwischen Implantat und Knochenoberfläche • Bioaktive Oberflächen
Regulative	<ul style="list-style-type: none"> • Zertifizierte Zulassung von Fertigungs- und Befestigungsmaterialien • Konformität entsprechend der Europäischen Medizinprodukteverordnung (MDR)