



Universität Augsburg

Fakultät für Angewandte Informatik

**Integrierter Ansatz zur individuellen
Teilehandhabung im Binder Jetting: Mechanische
Analyse, virtuelle Rekonstruktion und Optimierung
der Handhabungsreihenfolge**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät für Angewandte Informatik der Universität Augsburg

vorgelegt von: Ludwig Vogt, M.Sc.

geboren am: 15.09.1991 in Frankfurt (Oder)

eingereicht am: 06.08.2024

Anfertigung am Lehrstuhl: Lehrstuhl für Produktionsinformatik

Fakultät für Angewandte Informatik

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Lars Mikelsons

Tag der mündlichen Prüfung: 05.08.2025

Kurzfassung

Zur Automation des Materialflusses im Freistrahl-Bindemittelauftrag (engl. binder jetting technology) (BJ) wurden, basierend auf den Rohdaten des Bauteils (STL-Format), analytische Verfahren zur Bestimmung von Handhabungspositionen entwickelt. Somit kann für die Kombination aus Bauteil und Parallelbackengreifer ein möglichst umfangreicher Lösungsraum generiert werden. Für die Bewertung dieses Lösungsraumes wird anschließend eine automatisierte Finite Elemente Methode (FEM) eingesetzt mit einem idealisierten transversalen orthotropen Materialverhalten. Da zwischen der konstruierten STL-Datei und dem fertigen Bauteil ein signifikanter, geometrischer Unterschied besteht, wird aus den Präprozessor Daten der Anlage ein prozessspezifisches Bauteilmodell erzeugt. Die Rekonstruktion basiert auf einem voxelbasierten Verfahren, das Bauteildaten in Form von RGB-Werten als Input verwendet. Zusätzlich zur Erzeugung des Bauteilmodells werden die RGB-Daten in einem virtuellen Bauraum zur Rekonstruktion der Anlagendaten verwendet. Basierend auf diesem Abbild, werden Objektklassifikationen und -transformationen berechnet und eine Entnahmereihenfolge der Objekte mittels geometrischer Randbedingungen bestimmt. Hierdurch wird selbst bei dicht gepackten Bauräumen die kollisionsfreie Entnahme gewährleistet. Validiert und evaluiert wurde das entwickelte System digital in insgesamt 10 Testszenarien mit 15 unterschiedlichen Bauteilen. In der digitalen Evaluation konnten 96.4% der Objekte erfolgreich zugewiesen werden, und die Entnahme der Bauteile erfolgte mit einer Erfolgsquote von 94.7%. Das Vorgehen und die Funktionalität konnte in den realen Testszenarien bestätigt werden, allerdings konnten tieferliegende Bauteile im Bauraum, aufgrund zu großer externer Kräfte, nicht mehr erreicht werden. Somit resultiert in der realen Evaluation eine Erfolgsquote von 62.7%.

Abstract

To automate the material handling in the **BJ**, analytical methods for the determination of handling positions were developed based on the raw data of the component (**STL** format). This allows for the generation of a comprehensive solution space for the combination of the component and parallel jaw gripper. Subsequently, an automated **FEM** is used to evaluate this solution space with an idealized transversal orthotropic material behavior. Since there is a significant geometric difference between the designed **STL** file and the finished component, a process-specific component model is generated from the pre-processor data of the system. The reconstruction is performed on a voxel-based method, which uses component data in the form of **RGB** values as an input. In addition to generating the component model, the **RGB** data is used in the digital twin for the reconstruction of system data. Based on this representation, object classifications and transformations are calculated, and the order of object retrieval is determined from geometric constraints. This ensures a collision-free retrieval even in densely packed construction spaces. The developed system was validated and evaluated digitally in a total of 10 test scenarios with 15 different components. In the test scenarios, 96.4% of the objects could be successfully assigned, and the retrieval of the components resulted in a success rate of 94.7%. The procedure and functionality could be confirmed in the real test scenarios, but deeper components in the installation space could no longer be reached due to excessive external forces. This resulted in a success rate of 62.7% in the real evaluation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Glossar	XXV
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	4
1.3. Aufbau der Arbeit	5
1.4. Technologie Beschreibung Binder Jetting	6
1.5. STL-Datenformat	9
1.6. Einführung Handhabung	10
2. Stand der Technik	13
2.1. Greifpunktbestimmung	13
2.1.1. Analytische Greifpunktbestimmung	13
2.1.1.1. Online-Algorithmen	14
2.1.1.2. Offline-Algorithmen	18
2.1.1.3. Hybride Algorithmen	24
2.1.2. Empirische Greifpunktbestimmung	26
2.2. Mechanische Greifpunktbewertung	29
2.2.1. Analytische Ansätze	30
2.2.2. Numerische Methoden	30
2.2.3. Prozessspezifisches Bauteilmodell	36

2.3. Automatisierte Systeme zur Bauteilentnahme in der additiven Fertigung	37
2.3.1. Trägerkonzepte und zusätzlich gedruckte Hilfsgeometrien	37
2.3.2. Systeme ohne zusätzliche Trägerkonzepte und Hilfsgeometrien	39
2.3.2.1. Automatisierte Bauteilentnahme im Materialextrusion	
(engl. material extrusion) (MEX)	39
2.3.2.2. Konzepte zur Pulverentfernung im BJ	41
2.4. Ableitung des wissenschaftlichen Handlungsbedarfs	42
2.4.1. Greifpunktbestimmung	43
2.4.2. Greifpunktbewertung	44
2.4.3. Kontextbasierte Selektion der Greifpunkte	45
3. Computergestützte Greifpunktbestimmung	47
3.1. Kraftschlüssige Greifpunkte	48
3.1.1. Ebene Kontaktflächen	48
3.1.1.1. Identifikation der Wirkflächen am Endeffektor	49
3.1.1.2. Bestimmung paralleler Flächen am Handhabungsobjekt	50
3.1.1.3. Polygon Clipping zur Bestimmung von Kontaktflächen	50
3.1.2. Punkt- und Linienförmige Kontaktpositionen	54
3.1.2.1. Neuvernetzung der STL-Dateien zur Generierung von	
Randschichten	55
3.1.2.2. Identifizierung konvexer Stellen am Handhabungsobjekt	57
3.1.2.3. Bestimmung antipodaler konvexer Bereiche	59
3.2. Formschlüssige Kontaktpositionen	59
3.2.1. Bestimmung der Verschiebungsrichtung \vec{s} durch zufällig initiali-	
sierte Punktcluster	60
3.2.2. Erstellung und Abgleich der Featuresets	62
3.2.3. Bestimmung der affinen Transformation	64
3.2.4. Erweiterung des partiellen Formabgleichs für Parallelbackengreifer	65
3.3. Hybride Kontaktformen	66
4. Mechanische Greifpunktbewertung	69
4.1. Prozessspezifisches Bauteilmodell	70
4.1.1. Bestimmung der räumlichen Diskretisierung anhand der bitmaps	71
4.1.2. Voxelbasierte Rekonstruktion der STL-Datei	72
4.1.3. Geometrische Approximation der Grenzfläche	73
4.2. Modellierung prozessspezifischer Materialkennwerte	75

4.3. Vernetzung	77
4.4. Mathematische Formulierung der Belastungsanalyse für additiv gefertigte Bauteile	77
4.4.1. Schwache Form der PDE für linear elastisches Materialverhalten	78
4.4.2. Randbedingungen für den statischen Belastungsfall	79
4.4.2.1. Geometrische Randbedingungen	80
4.4.2.2. Mechanische Randbedingungen	81
4.4.3. Randbedingungen für den dynamischen Belastungsfall	82
4.4.3.1. Geometrische Randbedingungen	82
4.4.3.2. Mechanische Randbedingungen	82
4.5. Bewertung der Bauteilbelastung Q_S	83
4.5.1. Spannungen Q_σ	84
4.5.2. Kombinierte mechanische Belastung	84
5. Erzeugung eines virtuellen Bauraums und Ableitung der Handhabungsreihenfolge	87
5.1. Rekonstruktion der Daten aus dem Präprozessor	87
5.2. Identifikation der Handhabungsobjekte	88
5.2.1. Bildung von Objektclustern anhand des Punktabstandes	88
5.2.2. Objekterkennung aus den rekonstruierten Anlagendaten	90
5.3. Transformation der offline generierten Produktdaten	90
5.4. Ableitung der Handhabungsreihenfolge	91
5.4.1. Downsampling der Greifpunkte	91
5.4.2. Geometrische Randbedingungen	92
5.4.2.1. Einbettung in den virtuellen Druckbereich	92
5.4.2.2. Top-Down Prinzip für die Entnahme der Objekte	93
5.4.2.3. Statische und Dynamische Kollisionsanalyse mit weiteren Objekten im Bauraum	94
5.4.2.4. Vermeidung von Kavitäten bei der Entnahme	95
5.4.3. Entnahmereihenfolge	96
6. Evaluation	97
6.1. Softwaretechnische Umsetzung	97
6.2. Testumgebung	98
6.2.1. Endeffektor	98
6.2.2. Testobjekte	99

6.2.3. Testszzenarien	99
6.2.4. Materialparameter	101
6.2.5. Ausfallkriterium	104
6.3. Handhabungspositionen	104
6.4. Mechanische Bewertung	109
6.5. Digitale Evaluation	112
6.5.1. Digitale Rekonstruktion der Daten	112
6.5.1.1. Einzelne Objekte	113
6.5.1.2. Objekte in einer Ebene	115
6.5.1.3. Zufällig positionierte Objekte	116
6.5.2. Transformation der Bauteile	117
6.5.3. Entnahmereihenfolge	119
6.6. Sim to Real Validierung	121
6.6.1. Reales Testbed	122
6.6.1.1. Eingangsdaten	122
6.6.1.2. Aufbau des Demonstrators	122
6.6.2. Transformation der Greifpunkte	124
6.6.2.1. Koordinatentransformation	124
6.6.2.2. Axis-Angle Darstellung	125
6.6.3. Ergebnisse	126
6.7. Diskussion der Ergebnisse	128
7. Zusammenfassung und Ausblick	131
Literaturverzeichnis	137
A. Anhang	163
A.1. Verwendete Grenzwerte in den mathematischen Modellen	163
A.2. Performance Vergleich verschiedener Clipping Algorithmen	164
A.3. Geometrische Abmaße der Konvexen Hüllen für die Testobjekte	165
A.4. Evaluation der Materialmodelle	165
A.4.1. Voigt Modell	165
A.4.2. Reuss Modell	165
A.4.3. Mori-Tanaka Modell	166
A.4.4. Hill Budiansky Modell	167
A.4.5. Elastizitätsmatrix C für transversal isotropes Materialverhalten	168

A.5. Rohdaten der rekonstruierten Testszenarien	168
A.6. Konvertierung von Pixel in DPI	169
Publikationen	177
Betreute Studienarbeiten	179
Eidesstattliche Erklärung	181

Abbildungsverzeichnis

1.1. Unterteilung der additiven Prozesskette in Pre-, In- und Post-Prozess nach International Organization for Standardization (ISO)/American Society for Testing and Materials (ASTM) 52920.	2
1.2. Darstellung einer BJ-Anlage mit den individuellen Komponenten zur Bauteilerstellung (Pulver, Aufschub Rolle, Druckkopf, Bindemittel, Grünling, Bauraum) sowie den individuellen Prozessschritten (Drucken, Aushärten, Entpulvern, Sintern) bis zum fertigen Bauteil.	7
1.3. Darstellung des STL-Formats. (a) 3D-Repräsentation der Stereolithographie (STL)-Daten einer Kugel (b) Oberflächeninformationen im ASCII-Format iterativ für jedes triangulierte Element dargestellt. Ein Element wird jeweils durch den Normalenvektor und die xyz-Koordinaten der dazugehörigen Eckpunkte repräsentiert.	10
1.4. Unterschiedliche Kontaktformen für die Kombination aus Endeffektor und Bauteil. (a) Linienkontakt (b) Punktkontakt (c) Flächenkontakt nach [Schmalz, 2018].	11
2.1. Segmentierung der Bilddaten zur Greifpunktbestimmung. (a) Identifizierung und Unterteilung der Objektkanten [Jabalamei et al., 2019] (b) Erstellung von primitiven Objekten aus den Objektkanten [Kim et al., 2013].	16
2.2. Bestimmung von Greifpositionen durch primitive Objekte. (a) Approximation von Zylindern [Lei et al., 2017] (b) Aufspannen von Hexaedern [Huebner et al., 2008] [Miller et al., 2004].	16
2.3. Bestimmung von Greifpositionen für menschenähnliche Hände. (a) Berechnung der Mittelachse [Vahrenkamp et al., 2017] (b) Approximation des Bauteils durch Kugeln mit unterschiedlichen Grenzwerten [Przybylski et al., 2012] (c) Detektion von Schleifen im Objekt [Pokorny et al., 2013].	19

2.4. Idealisierung der Kontaktstellen als Punktkontakte für den Greifer-	
Momentenraum durch die Kräfte $F_{1,2,3}$ und dem dazugehörigen Hebelarm	
$\vec{r}_{1,2,3}$	20
2.5. Vorgehen für die Greifpunktbestimmung nach [Honarpardaz et al., 2017].	
(a) Ableitung der Wirkflächen mittels boolescher Operationen zwischen	
dem Kontaktstück und dem Bauteil (b) Generierung des geometrisch	
konformen Endeffektors im Computer Aided Design (CAD)-Programm	
basierend auf dem Bauteil und den definierten Randbedingungen.	21
2.6. Identifikation von Greifpunkten mit einem partiellen Formabgleich [Li	
et al., 2005]. (a) Identifikation der Kontaktpunkte zwischen dem End-	
effektor (humanoide Hand) und einem Objekt (Computer Maus) (b)	
Darstellung der abgeleiteten Parametern $d_{1,2,3}, \omega_{1,2,3}$ aus dem Hilfsdrei-	
eck zur Erstellung des Featuresets.	23
2.7. Bildung von antipodalen Punktpaaren aus der Punktwolke zur Greif-	
punktbestimmung [Kleeberger et al., 2021a]. 1. Aufspannen eines Lösungsraums	
um einen Referenzpunkt 2. Abgleich der Normalenvektoren im Lösungsraum	
3. Kollisionsprüfung mit geometrisch einfachen Objekten für den Endef-	
fektor.	26
2.8. Bereitstellung der vorkonfigurierte Greifpositionen in den Trainingsdaten.	
(a) Darstellung in Bitmaps aus dem Cornell Datensatz [Fernandez et al.,	
2004] (b) Tiefenbilder (engl. depth images) aus dem Dex-Net Datensatz	
[Mahler et al., 2017].	27
2.9. Beispielhafte Architektur eines Convolutional Neural Network (CNN) zur	
Greifpunktbestimmung basierend auf Bilddaten mit den übergreifenden	
Schritten: Datenvorverarbeitung, Greifpunktbestimmung und Ausgabe.	
[Caldera et al., 2018][Kumra et al., 2016]	28
2.10. Prozessschritte für die manuelle FEM im Handhabungsprozess nach	
[Dharbaneshwer et al., 2021]. Ausgehend von den CAD-Modellen des	
Greifers und des Endeffektors erfolgt die Diskretisierung der Domäne	
sowie die Spezifizierung der Materialparameter. Im Anschluss an die	
Greifpunktbestimmung wird die Interaktion in der Kontaktfläche defi-	
niert und anschließend die Randbedingungen festgelegt.	32
2.11. Exponentielles Verhalten des Kontaktdrucks p gegenüber dem Abstand	
beider Kontaktflächen h [Boulbes, 2020].	33

2.12. Identifikation der Randbedingungen nach [Zaidi et al., 2017]. (a) Markierung der Kontaktstelle (b) Kreisförmiges Hilfsobjekt zur Bestimmung der Kontaktpunkte an der Objektoberfläche.	34
2.13. Schichtweiser Aufbau eines Werkstückträgers mit Substratplatte für das Pulverbettbasiertes Schmelzen (engl. powder bed fusion) (PBF)-Verfahren nach [Wollbrink et al., 2020b].	38
2.14. Strategien zur Bauteilentnahme im MEX-Verfahren nach [Becker et al., 2019]. (a) vertikale Entnahme entlang der z -Achse (b) Rotation um die y -Achse (c) Rotation um die x -Achse (d) Rotation um die z -Achse.	40
2.15. Pulverentfernung nach dem additiven Fertigungsprozess mit der <i>DPS 1000</i> von <i>Digital Metal</i> und den einzelnen Komponenten <i>Digital Metal DPS 1000</i> [2020].	42
3.1. Schematischer Ablauf der Greifpunktbestimmung für das basierend auf den STL-Dateien der Bauteile und des Endeffektors.	47
3.2. Schematischer Ablauf der Greifpunktbestimmung für ebene Kontaktflächen.	48
3.3. Selektion der der Wirkflächen (rot) für die Greifpunktbestimmung am Beispiel eines Co-Act EGP-C-40 der Firma Schunk mit planaren Kontaktstellen.	49
3.4. Vorgehen zur Ableitung der Kontur K_1 aus dem Polygon S_1 . (a) Identifikation aller Kanten $\vec{v}_{i,1,2,3}$ der enthaltenen Dreiecke t_1, t_2 (b) Speicherung aller einzigartigen Kanten (c) Eintragung der Kantenenden $V_{i,1}, V_{i,2}$ als Schlüssel-Werte Paare in einer Hashmap. Anschließend wird die Hashmap iterativ durchlaufen, bis der Startwert $V_{1,1}$ wieder erreicht wird. Hierdurch werden die Punkte der Kontur in der richtigen Reihenfolge angeordnet. (d) Darstellung der abgeleiteten Kontur bestehend aus $V_{1,1}, V_{1,2}, V_{2,2}, V_{3,2}$	51
3.5. Rotation der Polygone paralleler Flächen in die xy -Ebene mit der Rotationsmatrix R_{xy}	52
3.6. Diskretisierung des Lösungsraums mit einem kartesischen Netz für die ebene Greifpunktbestimmung und die Festlegung der potentiellen Greifpunkte (Polygon 1 \cap Polygon 2).	52

3.7. Bestimmung der gemeinsamen Fläche zwischen dem Endeffektor (rot) und dem Bauteil (blau) mittels Polygon Clipping. Die Kontaktfläche des Endeffektors wird an definierten Rasterpunkten positioniert und über die Bauteilfläche gelegt. Durch das Polygon Clipping entsteht das resultierende Polygon und repräsentiert die Schnittmenge beider Flächen.	53
3.8. Programmablauf für die Bestimmung von Punkt- und Linienkontakten am Handhabungsobjekt basierend auf STL-Daten. Der Ablauf ist in zwei Teilschritte unterteilt: 1. Randschichtvernetzung 2. Greifpunktbestimmung.	54
3.9. Gruppierung der Dreiecke in Oberflächen (S_1, S_2, S_3) und Ableitung der Kontur K_1 für einen Hexaeder.	56
3.10. Vorgehen zur Verschiebung der Eckpunkte für die Randschichtvernetzung. (a) Identifizierung der Eckpunkte $V_{1,1}, V_{1,2}$ auf dem Rand K_1 der Oberfläche (b) Einfügen von Hilfspunkten $OP_{1,1,1}, OP_{1,1,1}$ mit dem Abstand d zur aufgespannten Hilfsebene $E_{1,1,cmp}$. Gleichzeitig liegen die Hilfspunkte in der Hilfsebene $E_{1,1}$. (c) Einfügen des neuen Randpunktes $RP_{1,1}$ mit dem Abstand $2d$ zum ursprünglichen Eckpunkt $V_{1,1}$ mit Hilfe des Zentrums CP .	57
3.11. Einfügen der Randschicht in die STL-Datei. (a) Triangulation des Bauteils nach der Neuvernetzung eines Eckpunktes $V_{j,l}$ (b) Triangulation des gesamten Bauteils.	58
3.12. Initialisierung der konvexen Stellen auf dem Handhabungsobjekt. (a) Selektion eines Referenzdreiecks t_n (schwarz) und dessen Schwerpunkt AP (b) Bildung des Clusters T_1 aus den angrenzenden Dreiecken (grau).	59
3.13. Initialisierung der lokalen konvexen Hüllen. (a) Bildung der Konvexen Hülle aus dem Oberflächencluster T (b) Verschiebung von AP in Richtung \vec{n}_k mit der Länge d_{shift} als Hilfspunkt zur Klassifizierung des Oberflächenclusters.	60
3.14. Bestimmung antipodaler konvexer Stellen. (a) Berechnung des Abstands zweier Cluster $d(AP_{v,1}, AP_{v,2})$ anhand der Initialisierung zweier Dreiecksschwerpunkte (b) Überprüfung der geometrischen Überlappung beider Bereiche durch die Verschiebung von $AP_{v,1}$ in Richtung $-\vec{n}_{k(v,2)}$.	61
3.15. Ablauf der formschlüssigen Greifpunktbestimmung anhand von generierten Featuresets für den Greifer und die Bauteile.	61

3.16. Bestimmung der Bewegungsrichtung \vec{s} für Parallelbackengreifer, mit Hilfe zufällig generierter Oberflächenpunkte $P_{1,k}, P_{2,k}$ und den dazugehörigen Verbindungsvektoren $\vec{d}_{k,k}$.	62
3.17. Geometrische Beschreibung der Hilfsobjekte für zur Generierung der Merkmale für den formschlüssigen Geometrieabgleich. (a) Punktpaare mit Verbindungsvektor (b) Referenzdreieck.	63
4.1. Räumliche Verteilung 154 identifizierte Greifpunkte an einem Testobjekt.	69
4.2. Anordnung der bitmaps als Stapel, sowie die Rot-Grün-Blau (RGB)-codierten Stellen mit $\langle 255, 255, 255 \rangle$ (weiß) und ohne $\langle 0, 0, 0 \rangle$ (schwarz) Bindemittelauftrag.	71
4.3. Ableitung der STL-Datei mittels Booleschen Operatoren aus den hexagonalen Hilfsgeometrien.	73
4.4. Positionierung eines Voxel Grundkörpers ($l = \Delta x, b = \Delta y, h = \Delta z$) am Punkt $P_{i,j,k}$ für die Nachbildung der gedruckten STL-Datei.	75
4.5. Identifikation der geometrischen und mechanischen Randbedingungen anhand der Hilfsobjekte für den statischen Belastungsfall.	81
4.6. Identifikation der geometrischen und mechanischen Randbedingungen anhand der Hilfsobjekte für den dynamischen Belastungsfall mit den Beschleunigungen $\vec{a}_{1,\dots,6}$.	83
5.1. Schematischer Ablauf der Datenrekonstruktion, -transformation und der Ableitung der Enthamereihenfolge im [B.I]. Aus den bitmaps werden Punktwolken und Objektcluster abgeleitet und anschließend den STL-Dateien zugewiesen. Nach der Zuteilung werden die Daten transformiert und eine Handhabungsreihenfolge bestimmt.	88
5.2. Segmentierung der Punktwolke in Objekte. (a) Ursprüngliche Verteilung der Einträge in \mathbb{R}^2 (b) Klassifikation nach der euklidischen Distanz r_{min} und den daraus resultierenden Clustern $o_{1,2,3}$.	89
5.3. Erzeugung eines virtuellen Druckbereichs durch Hexaeder an den Seitenwänden (rot) für die einseitige Zugänglichkeit der gedruckten Bauteile (grau) im Bauraum.	93
5.4. Projektion $o_i \rightarrow \hat{o}_i$ dreier gedruckter Bauteile (grau) in die $\langle xz \rangle$ -Ebene und die daraus resultierende Sortierung (z_1, z_2, z_3) anhand des maximalen z -Wertes.	94

5.5. Erzeugte Hüllkörper für die gedruckten Bauteile (gelb), sowie den Endeffektor in einer Greifposition mit unterschiedlichen Anfahrpositionen $\vec{o}_\theta, \theta \in [0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$.	95
5.6. Additiv gefertigte Bauteile mit aufgespannten Kegeln (grün) als Hilfsgeometrie im Digitalen Zwilling für die Vermeidung von Kavitäten im Bauraum.	96
6.1. Entwickelte Systemarchitektur für die Zusammenführung der einzelnen Module zur automatisierten Bauteilhandhabung.	98
6.2. Darstellung des Schunk Co-Act EGP-C-40 [SCHUNK, 2024] mit planparallelen Greiferfingern.	99
6.3. Verwendete Bauteile in den Testszenarien. (a) Kugel (b) Zylinder (c) Mutter (d) Hexaeder (e) Kreisring (f) SileaneBrick (g) SileaneTLess22 (h) SileaneTLess20 (i) SileaneTLes29 (j) IPARingScrew (k) IPAGearShaft (l) SileaneCandleStick (m) SileanePepper (n) SileaneGear (j) SileaneBunny.	100
6.4. Materialkennwerte $E_{\parallel}, E_{\perp}, G_{\parallel}, G_{\perp}, \nu$ für den Verbundwerkstoff bestehend aus 316L und Polyvinylalkohol (PVA) mit dem <i>Voigt-, Hashin-Shtrikman-, Mori-Tanaka-, Hill Budiansky- und Reuss</i> Modell.	103
6.5. Detektierte Handhabungspositionen für die Testobjekte mittels konvexer Hüllen. (a) Kugel (b) Zylinder (c) Mutter (d) Hexaeder (e) Kreisring (f) SileaneBrick (g) SileaneTLess22 (h) SileaneTLess20 (i) SileaneTLes29 (j) IPARingScrew (k) IPAGearShaft (l) SileaneCandleStick (m) SileanePepper (n) SileaneGear (j) SileaneBunny.	105
6.6. Räumliche Positionierung der konvexen Punkte (rot) am Testobjekt Hexaeder.	107
6.7. Detektierte Kontakpositionen (rot) für die Objekte (a) Hexaeder und (b) SileaneTLess29 mit Hilfe der formschlüssigen Greifpunktbestimmung.	108
6.8. Vergleich der Triangulation zweier benachbarter Voxel. (a) Nach der Instanziierung (b) Nach der Extraktion der Oberfläche.	110
6.9. Vergleich der resultierenden Verschiebungen u an der originalen STL-Datei (a) und der voxelbasierten STL-Datei (b).	111
6.10. Darstellung des digitalen Demonstrators mit dem Roboterarm, Endeffektor und dem Bauraum.	113
6.11. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS1.	113

6.12. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS3.	114
6.13. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling mit $10 \cdot 10^3$ Einträgen in der Punktwolke für TS3. . .	114
6.14. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS4.	115
6.15. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS10. Falsch zugewiesene Objekte <i>SileaneBrick</i> (rot) und <i>SileaneGear</i> (blau) sind farblich markiert.	116
6.16. Vergleich der berechneten Transformationen für das Testobjekt <i>SileaneT-Less20</i> . (a) Iterative Closest Point (ICP)-Algorithmus (b) Dem partiellen Formabgleich (Partieller Formabgleich (PF)) (c) Einer Kombination aus beiden Verfahren (PF+ICP).	118
6.17. Mittlerer quadratischer Fehler (engl. Root Mean Squared Error) (RMSE) für die berechneten Transformationen der Bauteildaten für den ICP , PF+ICP und PF -Algorithmus.	119
6.18. Fehlgeschlagene Handhabungspositionen für den <i>SileaneBunny</i> in TS7.	120
6.19. Erfolgreiche Handhabungsposition für den <i>SileaneBunny</i> in TS10.	121
6.20. Setup des Demonstrators mit den individuellen Bestandteilen.	123
6.21. Aufbau des Druckbehälters zur Rekonstruktion der Testszenarien. Dar- gestellt ist die Positionierung des Bauteils von TS1.	123
6.22. Repräsentation eines Greifpunktes durch den Werkzeugmittelpunkt (engl. Tool Center Point) (TCP) und Orientierung \vec{o} des Endeffektors.	124
6.23. Komponenten der axis-angle Darstellung. \vec{e} : Rotationsachse, θ : Rotati- onswinkel.	125
6.24. Schiefe Ausrichtung der Positionierhilfe auf der Lochplatte infolge der Fertigungstoleranzen durch den MEX -Prozess.	127
6.25. Kontinuierliche Rotation des Endeffektors in TS6 zur Entnahme der <i>Mutter</i>	127
6.26. Greifpunkt und Pose des Endeffektors zur Entnahme der <i>Mutter</i> in TS6.	128
7.1. Darstellung des Morschen Spannungskreises mit dem Versagenskriterium nach Mohr-Coulomb.	135
A.1. Testobjekte für die Evaluation der Polygon Clipping Algorithmen mit eingefärbten Lösungsraum (rot) für die Greifpunktbestimmung.	164

A.2. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS2.	168
A.3. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS5.	169
A.4. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS6.	171
A.5. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS7.	172
A.6. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS8.	173
A.7. Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS9.	174

Tabellenverzeichnis

2.1. Zusammenfassung der Eigenschaften von online-, offline-, und hybriden Algorithmen zur Bestimmung von Handhabungspositionen.	14
6.1. Evaluierte Testszenarien und Anzahl der enthaltenen Objekte.	101
6.2. Materialparameter für das Bindemittel (PVA) und das Metallpulver (316L) des Grünlings in den Testszenarien.	102
6.3. Resultierende Materialkennwerte bestimmt mit dem <i>Reuss</i> Modell.	104
6.4. Ergebnisse der Greifpunktbestimmung für die 15 Testobjekte. *Rand-schichtvernetzer.	106
6.5. Auswertung der formschlüssigen Greifpunktbestimmung für die Testobjekte <i>Hexaeder</i> und <i>Box</i>	109
6.6. Vergleich der Metadaten der ursprünglichen STL-Datei mit der prozessspezifischen STL-Datei (STL*).	110
6.7. Vergleich der berechneten, maximalen Dehnungen ϵ in der originalen STL-Datei und der prozessspezifischen STL-Datei (STL*).	112
6.8. Auswertung der geometrischen Überprüfung zur Bestimmung einer Entnahmereihenfolge in den digitalen Testszenarien.	120
6.9. Auswertung der geometrischen Überprüfung zur Bestimmung einer Entnahmereihenfolge in den realen Testszenarien.	126
A.1. Eingestellte Parameter für die Ausführung der individuellen Module.	163
A.2. Darstellung der durchschnittlichen Berechnungszeit [s] und der Zuverlässigkeit [%] des <i>Weiler Atherton</i> Algorithmus, <i>Vatti</i> Algorithmus, <i>OBBTree</i> Verfahren und <i>Dreiecksabgleich (T-T)</i> zur Bestimmung überlappender Polygone.	164
A.3. Volumen V der konvexen Hülle für die Testobjekte.	165
A.4. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS1 im Digitalen Zwilling.	168
A.5. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS2 im Digitalen Zwilling.	169
A.6. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS3 im Digitalen Zwilling.	169

A.7. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS3 im Digitalen Zwilling	
mit 10000 Datenpunkten.	170
A.8. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS4 im Digitalen Zwilling.	170
A.9. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS5 im Digitalen Zwilling.	171
A.10. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS6 im Digitalen Zwilling.	172
A.11. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS7 im Digitalen Zwilling.	173
A.12. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS8 im Digitalen Zwilling.	174
A.13. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS9 im Digitalen Zwilling.	175
A.14. Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS10 im Digitalen Zwilling.	175

Symbolverzeichnis

Griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
α	Zulässige Überlappung zweier Punktkontakte	mm
β	Winkel	rad
γ	Oberflächenspannung	kg/s^2
ϵ	Dehnung	%
η	Dynamische Viskosität	mPa
Θ	Kontaktwinkel zwischen Fluid und Festkörper	rad
θ	Winkel	rad
ν	Querkontraktion	-
σ	Normalspannung	N/mm^2
τ	Schubspannung	N/mm^2
Ω	Räumliche Domäne	-
$\partial\Omega$	Rand der räumlichen Domäne	-

Konstanten

Symbol	Beschreibung	Einheit
g	Erdbeschleunigung (9.81)	$\frac{m}{s^2}$
π	Kreiszahl (3.14)	-

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	mm^2
a	Grenzwert für den Abstand zweier Punktkontakte	mm
dA	infinitesimales Flächenelement	mm^2
\vec{a}	Beschleunigung	m/s^2
$A\vec{V}$	Anfahrvektor des Roboters für eine Handhabungsposition	-
b	Längenmaß	mm
BM	$\mathbb{R}^{l \times b \times n}$ -dimensionales Array mit RGB-Werten der einzelnen Pixel aus den bitmaps	-
C	Steifigkeitsmatrix	-
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Differential/Inkrementelle Verschiebung	mm
$d_{max,min}$	Min- und maximaler Öffnungsbereich des Endeffektors	mm
E	Elastizitätsmodul des Werkstoffs	N/mm^2
E_i	$-i$ -te Ebene in Hessischer Normalform	-
\vec{e}	Rotationsachse für die axis-angle Repräsentation	-
f	Kraftvektor	N
F_N	Normalkraft	N
F_T	Trägheitskraft	N
G	Schubmodul des Werkstoffs	N/mm^2
h	Längenmaß	mm
HBW	Britellhärte	-
$H_E^{n \times m}$	$n \times m$ -dimensionales Featureset für den Endeffektor	-

HK	Knoophärte	-
$H_O^{n \times m}$	nsm -dimensionales Featureset für das Handhabungsobjekt	-
HV	Vickershärte	-
K	Kontur eines Polygons oder Oberfläche	-
l	Längenmaß	mm
\vec{n}	Normalenvektor	-
N	Anzahl an Dreiecken	-
$\mathcal{O}(n)$	Charakterisierung der asymptotischen Komplexität eines Algorithmus bezüglich seiner Laufzeit bei einer bestimmten Eingabelänge n	-
O	Menge aller Punkte eines Objektes	-
o_n	n -tes Cluster von Einträgen aus der 3D-Punktvolke	-
\vec{o}	Orientierungsvektor des Endeffktors für einen Greifpunkt	-
P	$3 \times n$ Punktvolke	-
p	Punkt innerhalb der Punktvolke	-
Q	Qualitätsmetrik zur Bewertung eines Greifpunktes	-
R^n	n -dimensionaler Vektorraum	-
R_n	(3×3) Rotationsmatrix	-
R_e	Streckgrenze	N/mm^2
R_m	Zugfestigkeit	N/mm^2
r_{min}	Minimaler Abstand zwischen zwei Objektclustern	mm
\vec{R}	Orientierungsvektor des Endeffktors für einen Greifpunkt in axis-angle Darstellung	-

S	Oberfläche bestehend aus mehreren Flächen	-
\vec{s}	Öffnungs- und Schließrichtung eines Parallelbackengreifers	-
t	Zeit	s
Δt	Zeitschritt	s
t_i	i -tes Dreieck	-
T	Menge an Objekten im Bauraum der Anlage	-
u	Verschiebung	m
\tilde{u}	Virtuelle Verschiebung	m
V	Volumen	mm^3
V_i	i -ter Eckpunkt eines Elements	-
\vec{v}_i	Verbindungsvektor im Element i	-
v_f	Volumenanteil	%
V_{el}	Volumen eines Netzelements	mm^3

Abkürzungsverzeichnis

ABS Acryl-Butadien-Styrol

AF Additive Fertigung

AM Additive Manufacturing

ASCII American Standard Code for Information Interchange

ASTM American Society for Testing and Materials

BJ Freistrah-Bindemittelauftrag (engl. binder jetting technology)

BEM Boundary Elemente Methode

CAD Computer Aided Design

CNC Computerized Numerical Control

CNN Convolutional Neural Network

CT Computer Tomographie

DT Decision Tree

DEM Diskreten Elemente Methode

dpi Punkte pro Inch (engl. dots per inch)

FEA Finite Elemente Analyse

FEM Finite Elemente Methode

GPU Grafikprozessor (engl. Graphics Processing Unit)

ICP Iterative Closest Point

ISO International Organization for Standardization

KI Künstliche Intelligenz

LPBF Selektives Laserschmelzen (engl. Laser Powder Bed Fusion)

ML Machine Learning

MEX Materialextrusion (engl. material extrusion)

k-NN k-Nearest-Neighbor

NN Neural Network

OBB Oriented Bounding Box

PBF Pulverbettbasiertes Schmelzen (engl. powder bed fusion)

PCA Principal Component Analysis

PDE Partiellen Differentialgleichung (engl. Partial Differential Equation)

PF Partieller Formabgleich

PLA Polylactide

PVA Polyvinylalkohol

RAM Arbeitsspeicher (engl. Random Access Memory)

RGB Rot-Grün-Blau

RF Random Forest

RANSAC Random Sample Consensus

RL Reinforcement Learning

RMSE Mittlerer quadratischer Fehler (engl. Root Mean Squared Error)

RVE Repräsentatives Volumenelement

STP/STEP Standard for the Exchange of Product Data

STL Stereolithographie

SVM Support Vector Machine

SVD Singulärwertzerlegung (engl. Singular Value Decomposition)

TCP Werkzeugmittelpunkt (engl. Tool Center Point)

TS Testszenario

VRML engl. Virtual Reality Modelling Language

3MF 3D-Manufacturing-Format

Glossar

Arbeitsraum: In der Robotik stellt der Arbeitsraum den geometrisch nutzbaren Raum eines Roboters dar. Hingegen bezeichnet der Begriff in der additiven Fertigung die Baukammer eines 3D-Druckers.

Antipoden: Antipoden bezeichnen zwei Punkte einer Sphäre, die sich diametral gegenüberliegen.

Bauteil: Ein Bauteil repräsentiert ein einzelnes abgegrenztes Teil in der Fertigung. Äquivalent wird dies oft auch als Werkstück bezeichnet.

Bräunling: Als Bräunling wird das Bauteil nach dem Entbindungsprozess bezeichnet.

Dirichlet-Randbedingung: Definiert Werte, die auf dem Rand der Domäne $\partial\Omega$ von der Funktion angenommen werden.

Element: Ein Element stellt die grundlegendste geometrische Struktur in einem Netz dar und ist eine geschlossene Teilmenge des Gebiets mit einem Lipschitz-kontinuierlichen Rand, bei dem alle Knoten durch Kanten verbunden sind - bei STL-Modellen entspricht ein Element einem einzelnen Dreieck.

Endeffektor: Bezeichnet das letzte Element in der kinematischen Kette eines Roboters. Je nach Anwendung kann dies ein Greifer, Montagewerkzeug, Schweißgerät, Absaugung, Messgerät, Klebepistole, etc. sein.

Füllstruktur (engl. Infill): Die Füllstruktur bezeichnet die innerhalb des Bauteils generierte Stützstruktur. Gängige Muster sind bspw. Waben, Gitter, Dreiecke, Linien und Hexaeder. Die ausgewählte Stützstruktur trägt maßgeblich zum Gewicht, der Stabilität, der Festigkeit und der Steifigkeit des Bauteils bei.

Greiferfinger: Die Greiferfinger stellen das Verbindungsstück zwischen Endeffektor und Handhabungsobjekt dar, wobei je nach Applikation die Anzahl und Form variieren kann. Bei einem Parallellbackengreifer existieren typischerweise zwei Greiferfinger mit meist planaren Wirkflächen.

Grünling: Als Grünling wird der ungesinterte Rohling eines Bauteils bezeichnet.

Hashtabelle (engl. Hashmap): In Hashtabellen werden Schlüssel in Tabellenadressen umgewandelt und ermöglichen so eine effiziente Suche ohne den gesamten Datensatz zu durchlaufen.

Hessesche Normalform: In der Hesseschen Normalform wird die Ebenengleichung mittels eines Normalenvektors \vec{n} und dem Abstand zum Ursprung \vec{d}_{OE} beschrieben.

Hüllkörper (engl. Bounding Box): Ein Hüllkörper bezeichnet einen einfachen geometrischen Körper, der ein komplexes mehrdimensionales Objekt umschließt. Oft verwendete Hüllkörper sind bspw. Hexaeder, Sphären und Zylinder.

Iterative Closest Point: Ist ein Algorithmus um zwei Punktmengen P_1, P_2 aneinander anzupassen. Hierfür wird iterativ der Abstand von jedem Punkt aus P_2 zum nächsten Nachbarn in P_1 , nach der Transformation T , minimiert [Zhang, 2014]:

$$\min E = \sum_{(p_1, p_2) \in (P_1, P_2)} \|p_1 - Tp_2\|^2. \quad (0.1)$$

Knoten: Repräsentieren Gitterpunkte/Knotenpunkte im Netz.

Netz: Ein Netzwerk aus Elementen, die aus Knoten und Verbindungslinien bestehen.

Neumann-Randbedingung: Die örtliche Ableitungen normal zum Rand $\partial\Omega$ der Funktion wird vorgegeben.

Principal Component Analysis: Bezeichnet die orthogonale Projektion eines mehr-

dimensionalen Datensets auf einen linearen Raum geringerer Dimension, sodass die Varianz der Projektion minimal ist [Greenacre et al., 2022].

Random Sample Consensus: Ist ein iterativer Algorithmus zur Bestimmung von Modell Parametern aus einem Set an beobachteten Datenpunkten. Diese können Ausreiser und Rauschen enthalten [Fischler et al., 1981].

Singulärwertzerlegung (engl. Singular Value Decomposition): Beschreibt die Darstellung einer linearen Abbildung aus dem Produkt dreier spezieller Matrizen $M = USV$. U , V entsprechen orthonormalen Basen und beschreiben eine orthogonale Abbildung. Die Diagonalmatrix S enthält die Singulärwerte $\sigma_{1,2,3}$ und repräsentiert die axiale Streckung in Richtung der ursprünglichen Basis. [Arens et al., 2018]

Werkzeugmittelpunkt (engl. Tool Center Point): Als **TCP** wird die Zielkoordinate des Endeffektors bezeichnet. Dieser stellt häufig den Werkzeugmittelpunkt dar.

Vatti clipping Algorithmus: Zur Bestimmung eines Ergebnispolygons zweier Schnittpolygone wird ein Scanbeam-Ansatz verwendet. Mit der Analyse horizontaler Streifen anhand von definierten Regeln werden potentielle Schnittpunkte identifiziert und die Gebiete als internes oder externes Gebiet klassifiziert. [Vatti, 1992]

Voronoi-Strukturen: Abgeleitet vom Voronoi-Diagramm [Aurenhammer, 1991] stellen die Strukturen eine Zellstruktur dar, in der nur die Kanten abgebildet sind.

Weiler-Atherton Algorithmus: Zur Bestimmung eines Ergebnispolygons werden die Schnittpunkte zweier Schnittpolygone werden die bestimmten Schnittpunkte als eingehend oder ausgehend gekennzeichnet. Anhand dieser Kennzeichnung wird jeweils eine neue Liste mit Eckpunkten für die beiden Schnittpolygone erstellt und eine neue Untermenge, die das Ergebnispolygon bildet, ausgegeben. [Weiler et al., 1977]

Wirkflächen: Wirkflächen stellen die direkte Kontaktfläche zwischen dem Handhabungsobjekt und dem Endeffektor dar.

1. Einleitung

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit werden neben der Motivation (siehe Kapitel [1.1](#)), der wissenschaftlichen Zielsetzung (siehe Kapitel [1.2](#)) und dem strukturellen Aufbau der Arbeit (siehe Kapitel [1.3](#)) einige technische Grundlagen erläutert. Aufgrund der Vielzahl an Additive Manufacturing ([AM](#))-Verfahren zählt hierzu die technologische Beschreibung des Freistrah-Bindemittelauftrag (engl. binder jetting technology) ([BJ](#)) mit dem Aufbau der Anlage, den externen Einflussgrößen und den Produktionsparametern (siehe Kapitel [1.4](#)). Zudem erfolgt die Detaillierung des prozessspezifischen Datenformats (siehe Kapitel [1.5](#)) und einer Einführung in die Grundlagen der Greifsysteme (siehe Kapitel [1.6](#)).

1.1. Motivation

Der Einsatz von [AM](#)-Verfahren hat sowohl in der Wissenschaft als auch in der industriellen Produktion, als Ergänzung zu den klassischen Fertigungsverfahren (Gießverfahren, spanende Bearbeitung), seit den ersten Anwendungen kontinuierlich zugenommen [Lachmayer et al., [2016](#)] und besitzt aktuell ein Umsatzvolumen von 16.6 Mrd \$ [Himanshu J, [2022](#)]. Treiber für den Einsatz von [AM](#)-Verfahren sind vor allem die hohe Designfreiheit, die Materialvielfalt, eine reproduzierbare Bauteilqualität und erhöhte Prozessstabilität, sowie eine individuelle Produktkonfiguration [Alammar et al., [2022](#)]. Diese Eigenschaften ermöglichen eine schnelle, kundenspezifische Bauteilfertigung [Pérez et al., [2020](#)] [Ozkan et al., [2024](#)]. Besonders für Kleinserien mit geringen Stückzahlen in der Instandhaltung, bei der Fertigung von komplexen Ersatzteilen, im Musterbau und in der Prototypenfertigung werden deshalb [AM](#)-Verfahren eingesetzt [Gebhardt et al., [2016](#)]. Zusätzlich ergeben sich durch die Eigenschaften auch neue Geschäftsbereiche, wie bspw. eine On-Demand Fertigung.

Nach der [ISO/ASTM](#) 52920 [ISO/ASTM, [2024](#)] wird der additive Fertigungsprozess in Pre-, In- und Postprozess eingeteilt (siehe Abb. [1.1](#)).

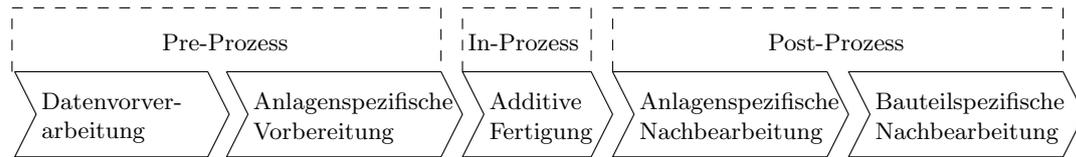


Abbildung 1.1.: Unterteilung der additiven Prozesskette in Pre-, In- und Post-Prozess nach [ISO/ASTM 52920](#).

Der Pre-Prozess umfasst die gesamte Datenvorbereitung und beinhaltet nach [Kumar et al., [2023](#)]:

- Das einlesen der [CAD](#)-Datei
- Die Datenüberprüfung
- Die räumliche Positionierung und Orientierung der Bauteile im Bauraum
- Die Generierung von benötigten Stützstrukturen Füllmustern (engl. Infill) für die Bauteile
- Die Einstellung relevanter Druckparameter (Temperaturen, Durchfluss, Leistung)
- Die Ableitung der Schichtdaten (engl. Slicing) zur Erzeugung der Maschinensteuerung
- Die Archivierung der Daten

Der In-Prozess beschreibt den eigentlichen Fertigungsprozess und dementsprechend den schichtweisen Aufbau des Bauteils [Pei et al., [2023](#)]. Als Post-Prozess werden alle nachgelagerten Schritte im Bereich der Bauteilentnahme, der Anlagennachbereitung und der Bauteilnachbehandlung bezeichnet [ISO/ASTM, [2024](#)]. Je nach Anwendung kann dies sowohl das Entladen der Anlage, die Bauteilreinigung, die Wärme- und Oberflächenbehandlung, sowie die Inspektion und Materialkontrolle beinhalten [Godec et al., [2022](#)]. Während die Prozessqualität und Prozessstabilität der einzelnen [AM](#)-Verfahren steigt und somit die Anlagen für einen Einsatz in der Serienproduktion geeignet sind, muss auch die additive Prozesskette, also alle vor- und nachgelagerten Tätigkeiten einem möglichst hohen Grad an Automation entsprechen [Tao et al., [2022](#)].

Die Datenverarbeitung im Pre-Prozess wird durch dedizierte Software übernommen, die durch den Anlagenhersteller oder Drittanbieter bereitgestellt wird. Ebenfalls wird der additive Fertigungsprozess durch die Maschinensteuerung autonom ausgeführt. Im Post-Prozess ist eine zusätzliche Interaktion mit den gedruckten Bauteilen notwendig.

Verfahrensbedingt können dabei mehrere Schritte notwendig sein, die die Anforderungen im Bereich der Automatisierung weiter erhöhen und bisher manuell ausgeführt werden [Hernandez Korner et al., 2020][Praveena et al., 2022].

Im [BJ] hat die mehrstufige Bauteilfertigung bestehend aus dem Druckprozess, dem Entpacken, dem Entbinden und dem Sintern der Bauteile (siehe Kapitel 1.4) Vorteile hinsichtlich der Skalierbarkeit, Prozessgeschwindigkeit und der Anlagenkosten [Kumar et al., 2016]. Genau hierdurch wird allerdings auch die Automatisierung des vollständigen Produktionsprozesses erschwert. Zwischen den einzelnen Schritten muss unter Berücksichtigung der prozessbedingten Bauteileigenschaften, der Bauteiltransport sichergestellt werden. Zu den prozessbedingten Eigenschaften zählt die Geometrie, eine eingeschränkte Festigkeit und die Härte der Bauteile nach dem Druck, da erst während dem Sintern die finalen Bauteileigenschaften resultieren. Diese, zum Teil eingeschränkten Festigkeiten gegenüber äußeren Kräften, erschweren den Einsatz in einem automatisierten Produktionssystem, da hierfür ein stabiles, robustes und resilientes Verhalten der inbegriffenen Subsysteme gefordert wird [George et al., 2021]. Zusätzlich ist die Zugänglichkeit der Bauteile durch das ungebundene Pulver eingeschränkt und die Detektion der Bauteile durch den Einsatz direkter optischer Messsysteme nur schwer möglich. Aufgrund dieser prozesstechnischen Besonderheiten, lassen sich bisherige Automatisierungskonzepte aus dem Selektives Laserschmelzen (engl. Laser Powder Bed Fusion) (LPBF) oder anderen AM-Verfahren nicht auf das BJ übertragen [Johnscher et al., 2020]. Beispielsweise würden bekannte Reinigungssysteme zum Entfernen des ungebundenen Pulvers durch Schwingungsanregung [Tenney et al., 2018] zu einer Beschädigung des Bauteils führen und die Verwendung von Trägerkonzepten [Arndt et al., 2018] resultiert in einer Verzögerung des Produktionsprozesses.

Je nach AM-Verfahren ist das entsprechende Datenformat auf die Konformität mit der jeweiligen Maschinensteuerung ausgelegt. Das Ein- und Auslesen dieser Daten ist bei den meisten Anlagen und Präprozessor Software durch eine TCP/IP-Schnittstelle möglich, da die Anlagen den aktuellen Trends in der Produktion wie bspw. Industrie 4.0, Big Data und Künstlicher Intelligenz entsprechen und eine durchgängige Datenverfügbarkeit während des gesamten Produktionsprozesses gewährleisten [Gaub, 2016]. Die Beschreibung der notwendigen Daten im anlagenspezifischen Format (G-Code, bitmaps) enthält alle geometrischen Informationen zur Produktion des Bauteils, jedoch in einer diskreten Darstellung. Ohne Aufbereitung und Transformation sind die Daten nicht für weiterführende Analysen und Berechnungen geeignet. Zusätzliche Informationen zur Produktion der Bauteile existieren meist nicht, weshalb alle notwendigen

Parameter aus dieser Datengrundlage abgeleitet werden müssen.

Eine manuelle Entnahme der Bauteile, wie sie bisher durchgeführt wird, ist nicht nur mit Blick auf eine durchgängig automatisierte Prozesskette und eine dynamische Serienproduktion impraktikabel, sondern stellt auch ein gesundheitliches Risiko dar [Chen et al., 2020]. Die während dem Entnahmeprozess aufgewirbelten Pulverpartikel besitzen sehr geringe Korngrößen ($\varnothing 16 - 63 \mu\text{m}$) [Mostafaei et al., 2021] und liegen somit an der Grenze zum Feinstaub ($10 \mu\text{m}$) [Christen, 2010]. Feinstaubpartikel können durch den geringen Durchmesser leicht zu einer Schädigung der Atemwege führen [Goix et al., 2014] [Onat et al., 2020]. Dabei macht es keinen Unterschied, ob die Pulverpartikel Metalle oder Polymere sind, für beide Werkstoffarten müssen bei diesen Voraussetzungen spezielle Schutzmaßnahmen (Absauganlagen, Filter, Schutzbekleidung) eingesetzt werden.

Unter diesen Aspekten stellt die automatisierte Bauteilentnahme im [B.J] einen notwendigen Schritt, zur Erhöhung der Technologiereife, für den Einsatz in der Serienproduktion dar. Aufgrund der vorherrschenden Randbedingungen im Produktionsprozess und der bestehenden Datengrundlage können bisherige Lösungen nicht direkt übertragen werden und fordern die Entwicklung eines individuellen Konzeptes für das [B.J].

1.2. Zielsetzung

Für eine Nutzung des [B.J] in einer automatisierten Serienproduktion muss der sichere und stabile Materialfluss zwischen den einzelnen Verfahrensschritten (Drucken, Entbinden, Sintern) gewährleistet sein. Der Fokus liegt hierbei auf dem Entnahmeprozess nach dem Drucken, bei dem die Bauteile sich im Bauraum umgeben von ungebundenen Pulver befinden. Die Handhabung des Bauteils im Anschluss an das Sintern entspricht einer konventionellen Pick-and-Place Anwendung, in der primär die Kollision mit der Umgebung vermieden werden muss. Verfahrensbedingt gilt deswegen die Bauteilentnahme aus dem Pulverbett nach dem Drucken als entscheidend für die durchgehende Automatisierung der Prozesskette im [B.J]. Aufgrund des Einsatzes in einem volatilen dynamischen Produktumfeld muss das System gleichermaßen robust, stabil und für ein breites Bauteilspektrum ausgelegt sein und eine hohe Genauigkeit für eine industrielle Anwendung aufweisen.

Damit die sichere, schadenfreie Handhabung der Bauteile sichergestellt ist, sind mechanische Gütekriterien notwendig. Aus dem Pre-Prozess sind die geometrischen Bauteildaten vorhanden, allerdings nicht direkt verfügbar, da diese in einer abstrakten,

3D-diskretisierten Darstellung komprimiert sind. Aus diesem Grund muss ein geeignetes Datenhandling entwickelt werden. Hierzu zählt die Anreicherung und Transformation der bereitgestellten Daten aus der Maschinensteuerung, damit alle notwendigen Prozesse ausgeführt werden können.

Neben der wissenschaftlichen Zielsetzung soll das Gesamtsystem eine modulare Struktur aufweisen, sodass einzelne Komponenten abgegrenzt sind und einfach substituiert und optimiert werden können. Dies gilt gleichermaßen für Softwaremodule und -funktionen die im Rahmen der Arbeit entwickelt werden. Zusammengefasst ergeben sich für das automatisierte Bauteilhandling im [\[B.\]](#) die folgenden Handlungsfelder:

- Greifpunktbestimmung
- Greifpunktbewertung
- Datenrekonstruktion

Neben einem solchen, prototypischen System soll ein entsprechendes methodisches Entwicklungsvorgehen entstehen, welches über das zu erforschende System hinaus auf andere Anwendungsfälle, nicht nur aus dem [\[AM\]](#)-Bereich, übertragbar ist und somit einen nachhaltigen Mehrwert schafft.

1.3. Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an die Motivation (siehe Kapitel [\[1.1\]](#)) und Zielsetzung (siehe Kapitel [\[1.2\]](#)) der Arbeit folgt eine technologische Beschreibung des Fertigungsverfahrens (siehe Kapitel [\[1.4\]](#)) mit dem prozessspezifischen Datenformat (siehe Kapitel [\[1.5\]](#)). Zusätzlich werden die Grundlagen im Bereich der Greifsysteme (siehe Kapitel [\[1.6\]](#)) erläutert. Im Stand der Forschung und Technik [\[2\]](#) werden bisherige Forschungsarbeiten im Bereich der Greifpunktbestimmung, der Greifpunktbewertung und der Datenrekonstruktion analysiert. Die drei Hauptgruppen ergeben sich aus dem Benchmarking bestehender Komplettlösungen und Automatisierungslösungen in anderen [\[AM\]](#)-Verfahren (siehe Kapitel [\[2.3.2\]](#)).

Im Stand der Technik wird seitens der Handhabung sowohl auf analytische und empirische Ansätze der Greifpunktbestimmung als auch auf die Gütekriterien eingegangen. Zusätzlich werden industrielle Lösungen für die Bauteilentnahme und abschließend der wissenschaftliche Handlungsbedarf abgeleitet. In den Kapiteln [\[3\]](#), [\[4\]](#) und [\[5\]](#) sind die wissenschaftlichen Grundlagen der entwickelten Systeme für die Greifpunktbestimmung,

-bewertung und die Rekonstruktion der Bauteildaten aufgeführt. In diesen Kapiteln liegt der Fokus auf den Modellierungsansätzen mit einer detaillierten Darstellung individueller Subsysteme und -funktionen. Die Validierung und Evaluation des Gesamtsystems und der einzelnen Subsysteme ist in 10 Testszenarien mit insgesamt 15 verschiedenen Objekten aufgeteilt (siehe Kapitel [6](#)), sodass alle Komponenten in Szenarien mit unterschiedlicher Komplexität evaluiert werden. Die Evaluation der einzelnen Module findet sowohl digital (siehe Kapitel [6.5](#)) als auch in einem realen Demonstrator (siehe Kapitel [6.6](#)) statt. Abschließend werden die Forschungstätigkeiten und Ergebnisse zusammengefasst, kritisch diskutiert und ein Ausblick für weitere Forschungsaktivitäten im Bereich der Prozessautomatisierung für das [BJ](#) gegeben (siehe Kapitel [7](#)). Zusätzliche Informationen zur Ausführung der einzelnen Programme, den Testszenarien und eine Darstellung der vollständigen Versuchsergebnisse ist im Anhang [A](#) gegeben.

1.4. Technologie Beschreibung Binder Jetting

Als eines der am längsten etablierten Fertigungsverfahren, seit dessen Entwicklung 1993 am Massachusetts Institute of Technology, im Bereich der additiven Fertigung bildet das [BJ](#) nach der [ISO/ASTM 52900](#) eine der 7 Hauptkategorien im [AM](#)-Bereich und wird als Pulver-Bindendes-Verfahren oder Pulverbasiertes-Verfahren kategorisiert [Gibson et al., [2021](#)]. Aufgrund der verfahrenstechnischen Ähnlichkeit zum Tintenstrahldruck hat sich die im allgemeinen Sprachgebrauch oft verwendete Bezeichnung „3D-Drucken“ für das [BJ](#) etabliert. Bei einer genauen Betrachtung der Abgrenzung ist diese Bezeichnung jedoch nicht ganz korrekt, da der „3D-Druck“ eine Subkategorie der additiven Fertigung darstellt und die Erzeugung kleinerer Batchgrößen für nicht-industrielle Anwendungen umfasst [Gebhardt et al., [2018](#)]. Hingegen bezeichnet die additive Fertigung die industrielle Anwendung [Gebhardt et al., [2018](#)]. Im Gegensatz zu anderen [AM](#)-Technologien, in denen das fertige Bauteil direkt nach dem Fertigungsprozess entnommen werden kann, zählt das [BJ](#) zu den mehrstufigen Verfahren, da nachfolgende Prozessschritte (siehe Abb. [1.2](#)) bis zu einem endfesten Bauteil notwendig sind. Die Qualität des Bauteils im [BJ](#) wird von einer Vielzahl an Parametern wie bspw. dem Bindemittel, der Korngröße- und -form des Pulvers, dem Bindemittelauftrag, der Trocknungszeit und der Schichtdicke beeinflusst. Wie bei allen [AM](#)-Technologien entsteht das Bauteil im [BJ](#) durch einen sukzessiven, schichtweisen Aufbau, basierend auf einem 3D-[CAD](#) Modell. Zwar gibt es seit der Entwicklung und Patentierung des [BJ](#) unterschiedliche Anlagentypen, jedoch sind die grundlegenden Prozessschritte weitestgehend unverändert. Auf die erzeugte

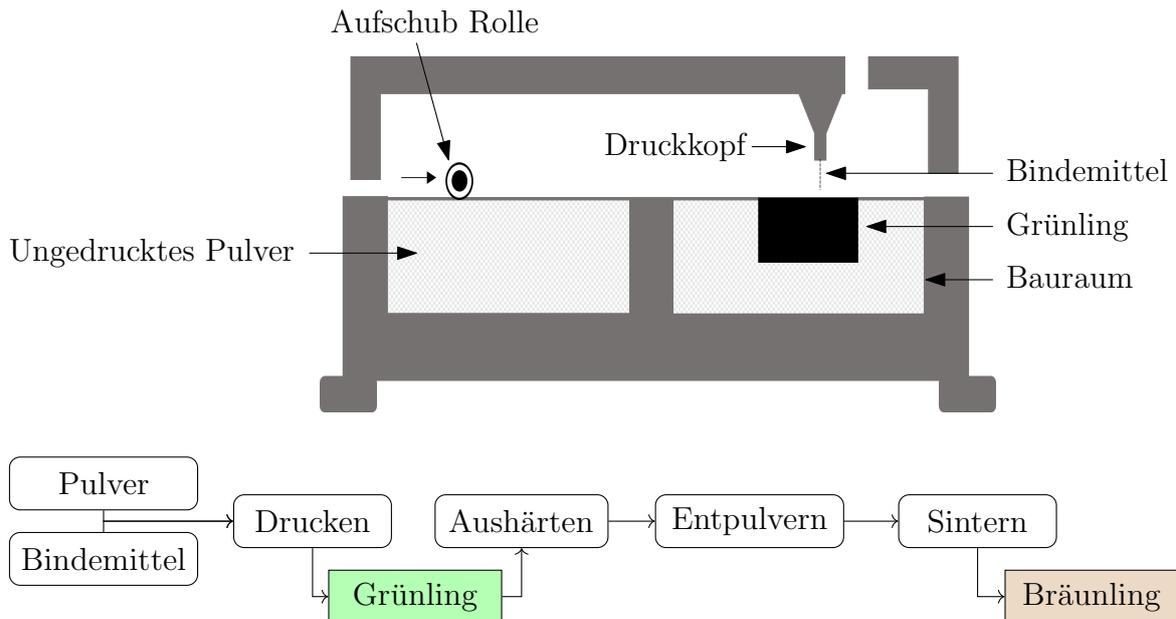


Abbildung 1.2.: Darstellung einer **B.J.**-Anlage mit den individuellen Komponenten zur Bauteilerstellung (Pulver, Aufschub Rolle, Druckkopf, Bindemittel, Grünling, Bauraum) sowie den individuellen Prozessschritten (Drucken, Aushärten, Entpulvern, Sintern) bis zum fertigen Bauteil.

Pulverschicht wird flüssiges Bindemittel mittels eines Druckkopfes aufgetragen, sodass die einzelnen Partikel und Schichten miteinander gebunden werden. Nach jeder Schicht wird das Bindemittel durch Wärmeeintrag ausgehärtet. [Ziaee et al., 2019]

Im Bereich der Druckköpfe existieren zwei unterschiedliche Technologien, die entweder sequentiell nach Bedarf oder kontinuierlich Bindemittel bereitstellen. Die Bahn des Druckkopfes resultiert aus den generierten Schichten im Präprozessor. Im Gegensatz zu Computerized Numerical Control (**CNC**)-basierten **AM**-Verfahren, in denen die Steuerung anhand eines G-Codes erfolgt, werden die einzelnen Schichten in bitmaps ausgegeben. In der bitmap werden Bauteilpunkte mittels RGB-Werten individuell kodiert, wodurch der Pfad des Druckkopfes definiert ist. [Lores et al., 2019] Als Bindemittel werden überwiegend polymer- und wasserbasierte Bindemittel verwendet, da diese sowohl die benötigten rheologischen Eigenschaften (Viskosität, Oberflächenspannung) besitzen, dem Grünling genügend Festigkeit verleihen und sich wieder aus der Struktur entfernen lassen, ohne den Verbleib von schädigenden chemischen Rückständen. Da das Bindemittel die Räume zwischen den Partikeln ausfüllen soll, muss bei der Auswahl des Binders, die Viskosität, Dichte, Temperaturbeständigkeit und die Oberflächenspannung berücksichtigt werden. Der aufgetragene flüssige Binder sorgt bis zum nachgelagerten Sinterprozess für eine temporäre Bindung der Pulverpartikel in der erzeugten Form.

Während dem Sintern verflüchtigt der eingebrachte Binder. [Yanez-Sanchez et al., 2021] Nach dem Druckprozess befinden sich die gedruckten Werkstücke im Pulverquader mit einer sehr geringen Festigkeit. Zur Steigerung der Festigkeit wird deshalb nach dem Entpacken, der Binder teilweise ausgehärtet. Trotz der Festigkeitssteigerung sind die Bauteile nach dem Aushärten noch sehr spröde und können leicht beschädigt werden. Erst nach dem anschließenden Sintern in einem Sinterofen unter kontrollierter Atmosphäre, entsteht eine Bindung zwischen den Pulverpartikeln durch Festkörperdiffusion oder Bildung einer flüssigen Phase. Ausführliche Beschreibungen mit einer detaillierten physikalischen und chemischen Erläuterungen auf Makro- und Mikroebene während dem Sintern sind in [Stojanović, 1999] zu finden. Nach dem Sintern liegt die Dichte der Grünlinge deutlich unterhalb der Bräunlinge. Nach [Yun et al., 2017] können die Unterschiede bis zu ca. 50 % betragen. Somit besitzen die Grünlinge auch deutlich geringere Festigkeiten [Enneti et al., 2019]. Die genaue Ausprägung ist dabei immer Abhängig von den Materialkombinationen und Maschinenparametern. Bspw. besitzen nach [Chen et al., 2023] Werkstoffproben aus 316L ¹ nur die 5 % Festigkeit eines gesinterten Materials (Bräunling).

Im Sinterprozess verdampft zunächst das Bindemittel bei ca. 200 – 300° C, restliches Bindemittel karbonisiert bei höheren Temperaturen und diffundiert durch die Werkstückoberfläche [Mirzababaei et al., 2019]. Die Verdichtung des Materials wird anschließend entweder durch die Einbringung (engl. Infiltration) eines Materials mit geringerem Schmelzpunkt oder durch das Sintern bewirkt. Während dem Sintern reduziert sich die Oberfläche des gedruckten Werkstücks durch Diffusion [Mirzababaei et al., 2019], wodurch sich die Mikrostruktur ändert, indem die Poren zwischen den einzelnen Partikeln geschlossen werden. Die Verdichtung des Materials führt zu einer meist linearen Schwindung der Werkstücke. Im Gegensatz dazu schwinden infiltrierte Werkstücke deutlich weniger beim Sintern, da die Partikel Zwischenräume mit zusätzlich eingebrachten Material bereits gefüllt sind. Allerdings entsteht durch die Einbringung unterschiedlicher Materialien eine Mischverbindung [Mirzababaei et al., 2019]. Wie bei allen Verbundwerkstoffen muss die Kompatibilität der Materialien beachtet werden, um eine sichere und stabile Verbindung zwischen der Matrix (infiltriertes Material) und dem Verstärkungsstoff (gedrucktes Material) zu ermöglichen.

Im Vergleich zu laserbasierten Produktionsverfahren ist das Drucken größerer Bauteile nicht durch die Produktionsanlage begrenzt, sondern primär durch die Schwindung

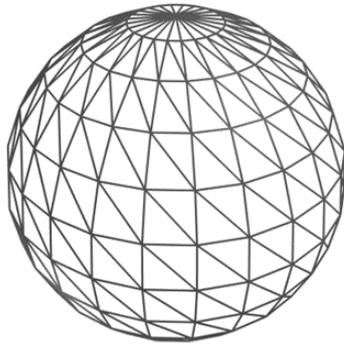
¹316L bezeichnet einen nichtrostenden, austenitischen Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl X5CrNiMo17-12-2 [Iron et al., 2024].

während des Sinterns. Da die Bauteile nicht direkt im Entstehungsprozess ausgehärtet, werden ist es möglich, Polymere, Metalle und Keramiken mit dem [BJ] zu fertigen. Für die verschiedenen Werkstoffe müssen lediglich das Bindemittel und die Prozessbedingungen beim Sintern angepasst werden. Neben dem breiten Werkstoffspektrum ist das Verfahren auch geeignet, um Mischverbindungen herzustellen. Zum einen ist die beschriebene Infiltration möglich, zum anderen können auch während des Druckens gezielt Schichten eines anderen Materials in Pulverform aufgebracht werden, um so Bereiche des Werkstücks mit unterschiedlichen Materialien zu fertigen [Mostafaei et al., 2021].

Im Gegensatz zu den laserbasierten Verfahren erfolgt eine geringe Wärme Einbringung während des Druckens wodurch Eigenspannungen und Phasenumwandlungen im Werkstoff vermieden werden. Zudem müssen keine Stützstrukturen gedruckt werden, diese Funktion wird vom unbenetzten Pulver in den Pulverschichten übernommen.

1.5. STL-Datenformat

Als Dateiformat in der additiven Fertigung werden überwiegend offene Dateiformate, wie bspw. [STL] [Stroud et al., 2000], Standard for the Exchange of Product Data ([STP/STEP]) [Anderl et al., 2000] und 3D-Manufacturing-Format ([3MF]) [Savio et al., 2019] verwendet. Im Gegensatz zu proprietären Formaten, sind diese Dateien frei zugänglich und können von vielen unterschiedlichen [CAD]-Systemen ein- und ausgelesen werden. Jedes der drei Datenformate hat individuelle Vor- und Nachteile für bestimmte Anwendungen, weswegen die meisten Präprozessoren in der Lage sind sowohl [STL], [STP/STEP] und [3MF] zu verarbeiten. Vergleicht man die Datenformate, wird zwar in jedem Format die Geometrie des [CAD]-Modells abgebildet, jedoch in unterschiedlicher Weise und mit unterschiedlichem Informationsgehalt [Gebhardt, 2016]. Im [STL]-Format ist neben dem Objektname nur die triangulierte Oberfläche als geometrische Information enthalten, jedoch keine weiteren Metadaten (Farbe, Volumen, Gewicht) (siehe. Abb. [1.3]). Auch eine Segmentierung von Produktgruppen ist im [STL]-Format nicht durchführbar, da innerhalb der Datei keine Zuweisungen zwischen den Netzelementen und den Komponenten existieren. Die enthaltenen Informationen lassen ohne weitere Berechnung wenige Aussagen über das [CAD]-Modell zu, reichen aber aus um, das Slicing im Präprozessor durchzuführen und die benötigten Daten für die Anlagensteuerung bereitzustellen. In Abbildung [1.3] ist der Dateiaufbau, bestehend aus dem Header, einer inneren Schleife und dem Schluss im American Standard Code



(a) 3D-Repräsentation

```

Solid STL
facet normal 1.22e-001 -4.74e-002 9.91e-001
  outer loop
    vertex 5.37e-016 -2.93e-016 1.00e+001
    vertex 2.27e+000 -1.23e+000 9.65e+000
    vertex 2.51e+000 -6.10e-001 9.65e+000
  endloop
endfacet
      :
facet normal -3.83e-001 4.12e-002 9.22e-001
  outer loop
    vertex -2.51e+000 6.10e-001 9.65e+000
    vertex -4.99e+000 -1.17e-001 8.66e+000
    vertex -2.58e+000 -6.10e-002 9.65e+000
  endloop
endfacet
endsolid STL
    
```

(b) ASCII-Format

Abbildung 1.3.: Darstellung des STL-Formats. (a) 3D-Repräsentation der STL-Daten einer Kugel (b) Oberflächeninformationen im ASCII-Format iterativ für jedes triangulierte Element dargestellt. Ein Element wird jeweils durch den Normalenvektor und die xyz -Koordinaten der dazugehörigen Eckpunkte repräsentiert.

for Information Interchange (ASCII)-Format dargestellt. In der inneren Schleife sind die Oberflächeninformationen des CAD-Modells in triangulierter Form, mit den jeweiligen Eckpunkten und dem Normalenvektor \vec{n} des Dreiecks enthalten. Die Orientierung des Normalenvektor ist immer nach außen gerichtet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit STL-Daten im Binär-Format abzuspeichern, diese Dateien sind aber ohne Konvertierung nur für Maschinen interpretierbar. Vorteil gegenüber dem ASCII-Format ist der deutlich geringere Speicherbedarf [Zhang et al., 2014]. Die einfache Konvention und Repräsentation der Objektoberfläche im STL-Format ermöglicht eine schnelle Weiterverarbeitung und Anreicherung der Daten, führt aber zu einer ungenaueren Replikation der Geometrie als im STP/STEP oder 3MF-Format. Im STL-Format ist die Genauigkeit der Geometrie abhängig von der minimalen Kantenlänge eines Dreiecks, da mit einer höheren Diskretisierung Krümmungen besser approximiert werden können. Für die entwickelten Methoden, Modelle und Algorithmen steht eine einfache Repräsentation und Interpretation der Daten im Vordergrund, weshalb alle durchgeführten Berechnungen auf dem STL-Format basieren.

1.6. Einführung Handhabung

Nach [Hesse, 2010] und [Fantoni et al., 2014] gehört zu den Funktionen eines Greifsystems die Positioniergenauigkeit, die Aufnahme statischer und dynamischer Kräfte, die

Lagebestimmung der Objekte, das Ändern von Position und Orientierung des Objekts sowie weiterführende technologische Schritte. Diese, recht allgemeine Definition eines Greifersystems, kann durch verschiedene Lösungsansätze und technologische Wirkprinzipien realisiert werden [Straßer, 2012]. Neben dem klassischen mechanischen Greifer, existieren sowohl Vakuumgreifer als auch magnetische Endeffektoren. Letztere finden überwiegend Anwendung bei der Handhabung an planaren Flächen und stellen meist Lösungen im Sondermaschinenbau dar [Fantoni et al., 2014]. Am verbreitetsten sind mechanische Greifer, da dieses Wirkprinzip den größten Freiheitsgrad hinsichtlich der handhabbaren Materialien aufweist [Hesse, 2011]. Unter den mechanischen Greifersystemen stellt der Parallelbackengreifer die mit Abstand am häufigsten verwendete Form des Endeffektors in industriellen Handhabungsprozessen dar [Babin et al., 2021]. Diese Konfiguration eignet sich nicht nur für ein breites Bauteilspektrum [Reinhart et al., 2018], sondern stellt auch die einfachste Kinematik mit der geringsten Anzahl an Freiheitsgraden dar. Somit eignet sich der Endeffektor für ein Höchstmaß an Bauteilen und wird deshalb in dieser Arbeit verwendet [Straßer, 2012]. Je nach Form des Objektes und des zu handhabenden Bauteils resultieren mit einem Parallelbackengreifer unterschiedliche Schlussarten (Form- und Kraftschluss) und Kontaktformen (siehe Abb. 1.4). Die dadurch entstehenden Kombinationen ermöglichen die Handhabung eines breiten Bauteilspektrums mit einem Endeffektor.

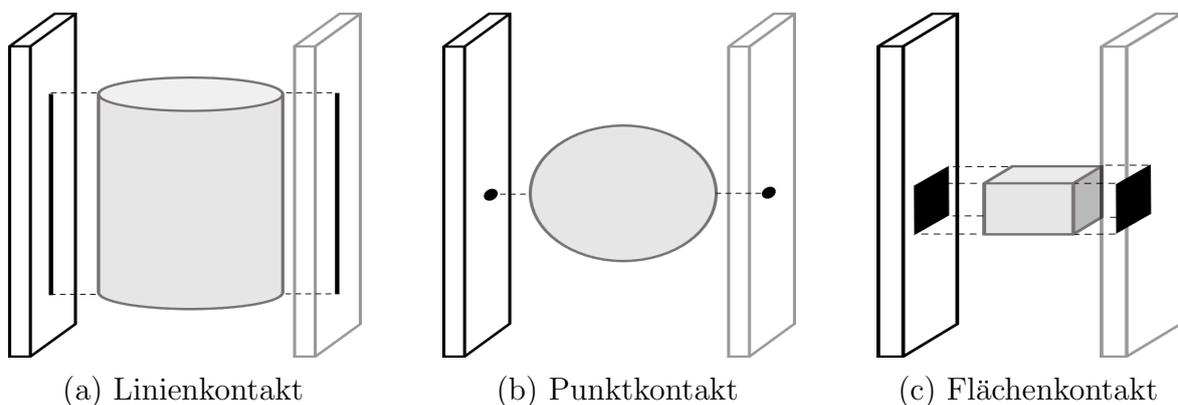


Abbildung 1.4.: Unterschiedliche Kontaktformen für die Kombination aus Endeffektor und Bauteil. (a) Linienkontakt (b) Punktkontakt (c) Flächenkontakt nach [Schmalz, 2018].

Zusätzlich sind auch hybride Kombinationen zwischen den einzelnen Schlussarten und Kontaktformen möglich, sodass je Greiferseite ein individueller Kontakt mit dem Bauteil entsteht. Solche dedizierten Konfigurationen schränken aber meist die Vielfalt des

Bauteilspektrums und der handhabbaren Geometrien ein.

2. Stand der Technik

Ausgerichtet an der Zielsetzung (siehe Kapitel [1.2](#)) werden im folgenden Kapitel relevante Forschungsarbeiten analysiert und im thematischen Kontext bewertet. Entsprechend der Handlungsfelder werden zunächst Algorithmen und Methoden zur Greifpunktbestimmung (siehe Kapitel [2.1](#)) sowie zur Greifpunktbewertung (siehe Kapitel [2.2](#)) betrachtet. Im Sinne der Vollständigkeit findet keine Eingrenzung auf industriell gefertigte Güter statt, sondern zusätzlich werden alltägliche Problemstellungen betrachtet. Weiterhin werden in [2.3](#) bisher entwickelte Komplettlösungen aus dem industriellen Umfeld beschrieben. Mit einer Zusammenfassung der bisherigen industriellen und wissenschaftlichen Forschungsarbeiten erfolgt die Ableitung des Forschungsbedarfs in den jeweiligen Handlungsfeldern [2.4](#).

2.1. Greifpunktbestimmung

Mögliche Klassifizierungen der Ansätze zur Bestimmung von Greifpositionen in Roboterapplikationen basieren auf der eingesetzten Hardware, wie bspw. der verwendeten Sensorik (Stereokamera, LiDAR) oder dem physikalischen Wirkprinzip des Endeffektors (Vakuumgreifer, Magnetgreifer, mechanische Greifer, Levitation). Für die vorliegende Arbeit wird eine Einteilung anhand der Datengrundlage und der mathematischen Modellierung gewählt, da so eine gemeingültige Klassifizierung möglich ist. Mit dieser Einteilung resultieren zwei Hauptkategorien. Die analytischen Modelle [2.1.1](#) basieren auf vordefinierten Algorithmen und Modellen zur Greifpunktbestimmung, wohingegen die empirischen Ansätze [2.1.2](#) auf einer bestehenden Datenbasis aufbauen.

2.1.1. Analytische Greifpunktbestimmung

Die analytischen Methoden lassen sich nach dem Berechnungszeitpunkt weiter in drei Subkategorien (online, offline, hybrid) unterteilen. Bei online-Algorithmen (siehe Kapitel [2.1.1.1](#)) werden die Greifpunkte während des Handhabungsprozesses bestimmt. Für diese Methoden ist immer ein zusätzlicher Vision Sensor notwendig um die Umgebung und die

Objekte zu detektieren [Fantoni et al., 2014]. Obsolet sind zusätzliche Sensoren bei offline ausgeführten Algorithmen (siehe Kapitel 2.1.1.2), allerdings wird bei diesen Ansätzen ein CAD-Modell (STL, STP/STEP) oder virtuelle Repräsentation des Handhabungsobjektes in Form einer Punktwolke benötigt, um vor dem Handhabungsprozess geeignete Greifpunkte zu bestimmen [Souza et al., 2021]. Eine Kombination aus beiden Verfahren stellen hybride Algorithmen dar (siehe Kapitel 2.1.1.3). Hierbei werden die online generierten Prozessdaten mit a priori generierten Informationen kombiniert [Kleeberger et al., 2021a]. Eine Gegenüberstellung der genannten Verfahren ist in Tabelle 2.1 gegeben.

Tabelle 2.1.: Zusammenfassung der Eigenschaften von online-, offline-, und hybriden Algorithmen zur Bestimmung von Handhabungspositionen.

	Zeitpunkt	Zusätzliche Vision Sensoren notwendig?	Handhabung unbekannter Objekte möglich?	Laufzeit	Stabilität
Online	ad hoc	Ja	Ja	o	–
Offline	a priori	Nein	Nein	+	++
Hybrid	ad hoc + a priori	Ja	Ja	-	++

2.1.1.1. Online-Algorithmen

Vision basierte Algorithmen zur Greifpunktbestimmung existieren sowohl mit 2D- als auch mit 3D-Kameradaten. Gemeinsames Merkmal der Methoden, basierend auf 2D-Kameradaten, ist die Erzeugung von Tiefeninformationen durch Mehrfachansichten. Schrott [Schrott, 1992] bestimmt aus 2D-Kameradaten Features des 3D-Objektes zur Berechnung der Greifpositionen für konvexe Polyeder. Für die Extraktion der Objektkanten wird zunächst ein 3D-Modell des Objektes aus den 2D-Kameradaten erstellt. Die Sequenzierung der Kamerapositionen erfolgt entlang eines vordefinierten Pfades um das Objekt herum. Anhand eines Regelwerkes werden Transformationen zwischen den Features und der aktuellen Kameraposition bestimmt, sodass der Greifer mit dem Objekt ausgerichtet ist und an zwei planaren Flächen angreift. Huang et al. [Huang et al., 2022b] nutzen ebenfalls 2D-Kameradaten zusammen mit eventbasierten Mehrfachansichten [Rebecq et al., 2016] um Tiefeninformation zu generieren. Zur Bestimmung einer geeigneten Greifposition wird mittels einer Principal Component Analysis (PCA)

die Hauptachse des Objektes bestimmt und mit dem errechneten Schwerpunkt des Objektes überlagert. Yamazaki et al. [Yamazaki et al., 2008] minimieren die Kosten für drei gewichtete Funktionen, in denen der Abstand zum Schwerpunkt des Objektes, der Kontaktbereich zwischen Greifer und Objekt, sowie die Orientierung des Greifers modelliert sind. Die Identifikation planarer Flächen ist mittels einer Gruppierung der Oberflächendaten [Bone et al., 2008] wie folgt möglich: Für die Gruppierung wird die Oberfläche trianguliert und die einzelnen Dreiecke anhand ihrer Normalenvektoren und Abstände zueinander in Teilmengen gruppiert. Alternativ kann die Gruppierung der Oberflächendaten in planaren Flächen mit dem Random Sample Consensus (RANSAC)-Algorithmus [Richtsfield et al., 2011] durchgeführt werden. Aus diesen Teilmengen lassen sich Paare für die Positionierung des Endeffektors bilden. Zusätzlich zu den 2D-Daten verwenden Wang et al. [Wang et al., 2014] eine Stereokamera mit der die Tiefeninformationen generiert werden und eine präzise bildbasierte Steuerung des Endeffektors ermöglicht wird. Prozessbedingt ist die Erzeugung von Mehrfachansichten im BJ äußerst schwierig, da die Bauteile nur einen sehr geringen Kontrast zum ungebundenen Pulver aufweisen und von diesem abgeschirmt bzw. umgeben sind. Ohne das Freilegen der Objekte können für diese Systeme keine Mehrfachansichten der Bauteile erzeugt werden. Durch die technologischen Fortschritte und die Entwicklung von Algorithmen zur Aufbereitung von Tiefeninformationen [Süße et al., 2014] wird in den meisten Anwendungen mit dem Vision Sensor ein digitales Abbild der Szene generiert. In diesen Szenarien ist der Vision Sensor entweder am Endeffektor angebracht und kann so unterschiedlich orientiert werden oder an einer Position fest montiert. Im Fall einer festen Montage ist der Vision Sensor überhalb der Objekte positioniert, sodass eine Draufsicht generiert wird. Kim et al. [Kim et al., 2013] nutzen die Oberflächendaten um primitive Formen zu bestimmen (siehe Abb. 2.1b) und mit diesen antipodalen Stellen zu identifizieren an denen der Greifer platziert wird. Die Oberflächensegmente werden mit der Hough Transformation [Illingworth et al., 1988] identifiziert und können anschließend mittels der Normalenvektoren verglichen werden. Jabalameli et al. [Jabalameli et al., 2019] bestimmen aus 2D-Daten Objektkanten und -konturen und führen anschließend ein Mapping der Pixel auf 3D-Koordinaten $R^2 \rightarrow R^3$ zur Bestimmung von Oberflächen durch (siehe Abb. 2.1a). Für die gebildeten Konturenpaare wird eine geometrische Überprüfung vorgenommen, um die Existenz eines Greifpunktes zu überprüfen.

Einen heuristischen Ansatz verwenden ten Pas und Platt [Pas et al., 2015] zur Generierung von Greifpunkten aus Punktwolken. Die geometrischen Randbedingungen, erstellt aus den Abmaßen des Greifers und eines erfolgreichen Griffes, werden über die Punkt-

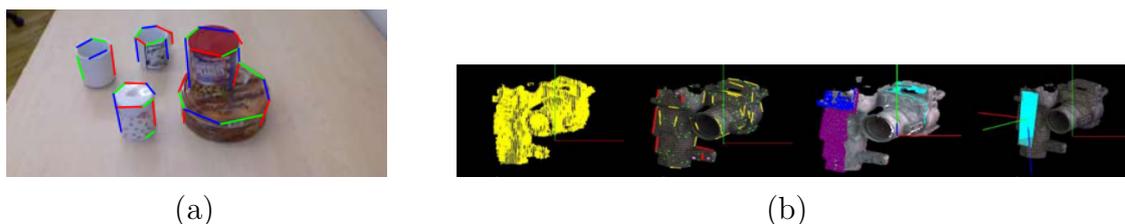


Abbildung 2.1.: Segmentierung der Bilddaten zur Greifpunktbestimmung. (a) Identifizierung und Unterteilung der Objektkanten [Jabalameli et al., 2019] (b) Erstellung von primitiven Objekten aus den Objektkanten [Kim et al., 2013].

wolke projiziert. Bei einer Übereinstimmung können so Greifpunkte identifiziert werden. Neben der direkten Suche nach antipodalen Stellen kann auch eine Segmentierung der Punktwolke genutzt werden. Lei und Wisse [Lei et al., 2017] identifizieren zylindrische Formen (siehe Abb. 2.2a) in den bereitgestellten Daten durch den Abgleich lokal aufgespannter Hilfsgeometrien mit Hilfe der Normalenvektoren aus Objektoberfläche. Die Identifikation der Zylinderachsen wird mittels einer PCA bestimmt. In [Huebner et al., 2008] werden die Hüllkörper minimiert und anschließend primitive Objekte gebildet (siehe Abb. 2.2b).

Aleotti und Caselli [Aleotti et al., 2012] nutzen einen Reeb-Graph [Bollen et al., 2021] zur Segmentierung eines Objektes zusammen mit Formfindungs-Algorithmen um die Objekte in bekannte, primitive Formen zu unterteilen. Nieuwenhuisen et al. [Nieuwenhuisen et al., 2012] erstellen ebenfalls einen Graphen für das 3D-Objekt und bestimmen primi-

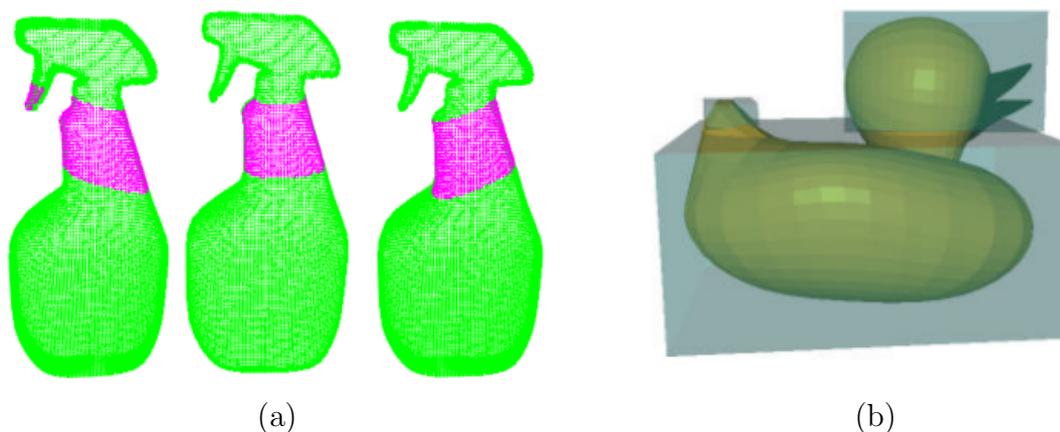


Abbildung 2.2.: Bestimmung von Greifpositionen durch primitive Objekte. (a) Approximation von Zylindern [Lei et al., 2017] (b) Aufspannen von Hexaedern [Huebner et al., 2008] [Miller et al., 2004]

tive Formen z. B. Hexaeder, Kugeln und Zylinder mittels eines **RANSAC**-Algorithmus. Weitere Ansätze zur Segmentierung basieren auf einer Gaußschen Krümmungsanalyse [El-Khoury et al., 2007] oder durch die Bildung konvexer Hüllen [Lopez-Damian et al., 2005] [Lien et al., 2006]. Diese Segmentierung und Approximation der Bauteile mit einfachen Geometrien, für die bereits Greifposen bestimmt sind, erleichtert zwar die Bestimmung von Greifpositionen erschwert aber die anschließende Greifpunktbestimmung. Durch die Abstraktion der Bauteilgeometrie stellen die Kontaktstellen zwischen dem Bauteil und dem Greifer nur eine Annäherung dar.

In [Rao et al., 2010] [Asif et al., 2014] wird diese Methodik zur Bestimmung von antipodalen Greifpunkten auf die einzelnen Einträge in der Punktwolke angewendet. Hierfür wird neben einer entgegengesetzten Orientierung der Normalenvektoren auch eine Kolinearität der 3D-Punkte gefordert. In [Lei et al., 2016] wird die Punktwolke auf eine Ebene projiziert, um somit die Kontur zu bestimmen und geeignete Kontaktpunkte für den Greifer berechnen zu können. Die Projektion der Datenpunkte erfolgt auf die Hauptebene des Objektes, welche die Mittelebene der Oriented Bounding Box (**OBB**) ist. Durch eine Verbindung benachbarter Punkte und zusätzlich eingefügter Stützstellen werden Kontaktpunkte bestimmt. Aus dem Set an Kontaktpunkten werden durch die Forderung eines Kräfte- und Momentengleichgewichts anschließend Kontaktpaare identifiziert. Alternative können rechteckige Hilfsgeometrien verwendet werden [Lin et al., 2014], um in den Projektionen Greifpunkte zu bestimmen. Für die Modellierung der Objektkontur wird in [Calli et al., 2011] eine elliptische Fourier-Analyse [Caple et al., 2017] verwendet. Aus dieser Objektkontur kann anschließend durch die Berechnung der Extremalstellen und einem Kräfte- bzw. Momentengleichgewicht eine Bestimmung der Greifpunkte erfolgen. Lippiello et al. [Lippiello et al., 2013] verwenden eine elastische Hülle, kombiniert mit einem iterativen Vorgehen, um Kontaktpunkte zu bestimmen und anschließend ein Kräfte- und Momentengleichgewicht aufzustellen. Eine Anwendung der Greifpunktbestimmung direkt auf der Punktwolke ermöglicht die Identifizierung der Kontaktpunkte, jedoch besitzen diese Systeme keine Flexibilität hinsichtlich der Kontaktfläche des Greifers. Ausgelegt sind diese Systeme für einen Endeffektor mit planaren Kontaktstellen.

Im Gegensatz dazu wird die Fläche des Endeffektors in [Kaiser, 2009] berücksichtigt. Aus den **CAD**-Daten des Greifers werden die Wirkflächen abgeleitet und mittels des **ICP**-Algorithmus [Jost et al., 2002] in der Szene nach partiellen Modellüberlappungen gesucht. Hierdurch sind allerdings nur vollständige Überlappungen möglich und nicht sichergestellt, dass die Kontaktstellen auf der Objektoberfläche liegen.

2.1.1.2. Offline-Algorithmen

Zur Einbindung, Analyse und Anwendung der offline ausführbaren Algorithmen an den CAD-Modellen der Handhabungsobjekte steht spezifische Software zur Verfügung. Mit dem Tool *GraspIt!* [Miller et al., 2004] können Greifpunkte für ein definiertes Handhabungsobjekt und einen Greifer bestimmt werden. Die Greifpunktbestimmung basiert auf einer Zerlegung des Handhabungsobjektes in primitive Formen (Hexaeder, Zylinder, Kugeln, Kegel) [Miller et al., 2003] und einer vordefinierten Konfigurationen des Greifers. An den vereinfachten Teilbereichen wird der Greifer initialisiert und iterativ positioniert, um mögliche Greifpunkte zu bestimmen. Einen erweiterbaren Ansatz bietet das *OpenGRASP* [León et al., 2010] Framework. *OpenGRASP* stellt keine eigenen Algorithmen zur Greifpunktbestimmung bereit, sondern bietet durch seine Architektur und mittels der generalisierenden Beschreibung ein Softwareframework als Entwicklungsumgebung.

Nguyen [Nguyen, April 1986] führt die mathematische Formulierung eines kraftschlüssigen Griffes durch mathematische Ungleichungen durch. Aus diesem linearen Ungleichungssystem stellen linear unabhängige Vektoren, deren strikte positive Kombination null ergibt, eine kraftschlüssige Lösung des Systems dar. Eine Erweiterung dieses Ansatzes mit linearen Federn in den Kontaktpunkten [Nguyen, March 1987] ermöglicht eine detailliertere Evaluation des Greifpunktes, jedoch bleibt die Einschränkung eines kraftschlüssigen Griffes bestehen.

Smith et al. [Smith et al., 1999] reduzieren die Bestimmung von Greifpunkten an 3D-Objekten auf ein 2D-Problem. Ausgehend von einer definierten Richtung werden 2D-Schnitte des Objektes ausgeführt und die Kanten der Objektkontur identifiziert. Durch die Anwendung von 5 geometrischen Regeln werden anschließend Greifpunkte berechnet. Diese Vorgehensweise setzt allerdings voraus, dass eine geeignete Richtung bekannt ist oder identifiziert wird.

Basierend auf einem 3D-Objekt generieren Vahrenkamp et al. [Vahrenkamp et al., 2017] ein Grundgerüst des Mesh-Objektes. Die Struktur resultiert aus einer Krümmungsanalyse und der iterativen Kontraktion der Oberflächenpunkte des Objektes. Als Resultat wird ein Graph gebildet (siehe Abb. 2.3a), wobei alle Oberflächenpunkte eindeutig zu einem Knotenpunkt des Graphen zugeordnet sind. An einer vorselektierten Auswahl werden definierte Greiferkonfigurationen ausgewertet und evaluiert. Entspricht die Güte der Greifpunkte den vorherrschenden Minimalanforderungen wird der Knotenpunkt als

zulässiger Greifpunkt gespeichert. Eine komplexere Darstellung des Graphen ist durch

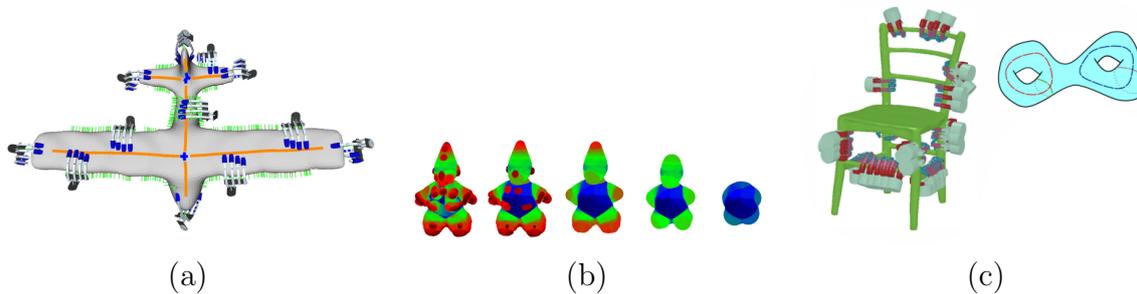


Abbildung 2.3.: Bestimmung von Greifpositionen für menschenähnliche Hände. (a) Berechnung der Mittelachse [Vahrenkamp et al., 2017] (b) Approximation des Bauteils durch Kugeln mit unterschiedlichen Grenzwerten [Przybylski et al., 2012] (c) Detektion von Schleifen im Objekt [Pokorny et al., 2013].

die Mittelachse möglich [Przybylski et al., 2012]. Die Knotenpunkte dieser Mittelachse repräsentieren die Mittelpunkte im Objekt verteilter Kugeln, die an mindestens zwei Positionen einen Schnittpunkt mit der Oberfläche des Objektes haben (siehe Abb. 2.3b). Ähnlich zur Segmentierung mit primitiven Körpern wird hierdurch die Bestimmung von Greifpositionen deutlich vereinfacht, jedoch liegen keine Informationen zu den genauen Kontaktflächen vor. Pokorny et al. [Pokorny et al., 2013] identifizieren Löcher in 3D-Objekten durch die Berechnung von Schleifen aus Oberflächenpunkten (siehe Abb. 2.3c). Diese Vorgehensweise schränkt allerdings auch den Anwendungsbereich ein, da bei Objekten ohne dieses Feature eine Anwendung fehlschlägt. Durch die Repräsentation des Greifers als stückweise lineare Funktion kann mit einem Optimierungsproblem der Greifer lokal an die Geometrie des Handhabungsobjektes angepasst und daraus Greifpunkte abgeleitet werden. Mit dieser Formulierung wird gleichzeitig die Umschließung des Greifers maximiert und Kollisionen mit anderen Objekten vermieden.

Für menschenähnliche Hände bzw. Endeffektoren gilt $n > 2$, wobei n gleich der Anzahl an Kontaktpunkten ist, kann ein Greifer-Momentenraum (engl. grasp wrench space) (GWS) bestimmt werden [Liu et al., 2015] [Lin et al., 2016] [Gebauer et al., 2023]. In diesem Raum sind alle Kräfte F und Momente M , die der Greifer auf das Handhabungsobjekt ausüben kann, abgebildet. Hierfür werden die Kontaktflächen als Punktkontakte idealisiert (siehe Abb. 2.4). Die von jedem Kontaktpunkt induzierte Drehung (engl. wrench) w_i setzt sich aus der Kraft F_i und den zum Schwerpunkt erzeugten Momenten

$M_i = r_i \times F_i$ zusammen, wobei r_i dem Hebelarm entspricht [Lin et al., 2016]

$$w_i = \begin{pmatrix} F_i \\ M_i \end{pmatrix}, \text{ mit } F_i, M_i \in \mathbb{R}^3. \quad (2.1)$$

Der *GWS* ergibt sich durch eine Linearkombination aller Kontaktpunkte mit der Gewichtung α_i und entspricht einer Teilmenge aller möglichen Kontaktpunkte nach [Pollard, 1994], wenn gilt

$$GWS = \sum_i^n \alpha_i w_i, \quad (2.2)$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad (2.3)$$

$$\sum_i^n \alpha_i \leq 1. \quad (2.4)$$

Liegt zudem eine detaillierte Beschreibung der benötigten Handhabungsaufgabe vor, kann ein aufgabenspezifischer Raum (engl. task wrench space) gebildet werden [Li et al., March 1987]. Hier kann der Stabilitätsnachweis unter Berücksichtigung externer Einflussfaktoren (Kräfte, Momente, Bewegungen) durchgeführt werden. Für eine unbekannte Beschreibung des Handhabungsvorgangs ergibt sich ein deutlich größerer Lösungsraum, woraus der optimale Griff mit einem objektbezogenen Momentenraum (engl. object wrench space) [Pollard, 1994] beschrieben werden kann. Eine Kombination beider Ansätze [Borst et al., 2004] ermöglicht eine optimierte Beschreibung der Lösung.

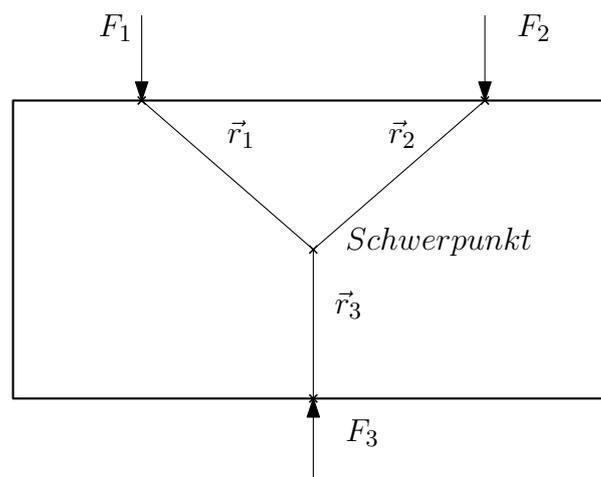


Abbildung 2.4.: Idealisierung der Kontaktstellen als Punktkontakte für den Greifer-Momentenraum durch die Kräfte $F_{1,2,3}$ und dem dazugehörigen Hebelarm $\vec{r}_{1,2,3}$.

Die Idealisierung der Kontaktflächen am Endeffektor als Punktkontakte ermöglicht die Identifikationen von Handhabungspositionen für Endeffektoren mit $n > 2$, allerdings findet keine geometrische Überprüfung in der Kontaktstelle statt und eine konforme Kontaktgeometrie ist nicht sichergestellt.

Während die meisten Ansätze gezielt den Lösungsraum für einen definierten Greifer berechnen, existieren auch Reverse Engineering Ansätze. Anders als bei den bisher aufgeführten Algorithmen wird bei diesen Methoden der Greifer anhand des Handhabungsobjektes ausgelegt. Pedrazzoli et al. [Pedrazzoli et al., 2001] schlagen ein regelbasiertes System zur Auswahl der Greiffläche vor. Je nach Objektform und Orientierung der Kontaktstellen wird unterschieden zwischen flachen, V-förmigen, zylindrischen Formen für die Greiferfinger, um eine möglichst hohe Formschlüssigkeit zu erreichen. Da eine automatisierte Implementierung fehlt, dient der Ansatz als Methodik und kann als Leitfaden bei der initialen Auswahl der Konfiguration hergenommen werden. Erweiterte, automatisierte Systeme mit diesem Ansatz sind in [Honarpardaz et al., 2017] und in [Schmalz et al., 2016] zu finden. Honarpardaz et al. [Honarpardaz et al., 2017] nutzen eine **PCA** zur Identifikation der Hauptachsen eines Objektes. An dieser Achse wird das CAD-Modell des Greifers positioniert und Greifpositionen durch einen Abgleich der Normalenvektoren berechnet. Für einen Griff aus den abgeleiteten Greifpositionen wird im nächsten Schritt in der CAD-Software *CATIA* durch ein *C++* Script die Form der Greiferfinger generiert (siehe Abb. 2.5). Das Ableiten generiert eine spezifische

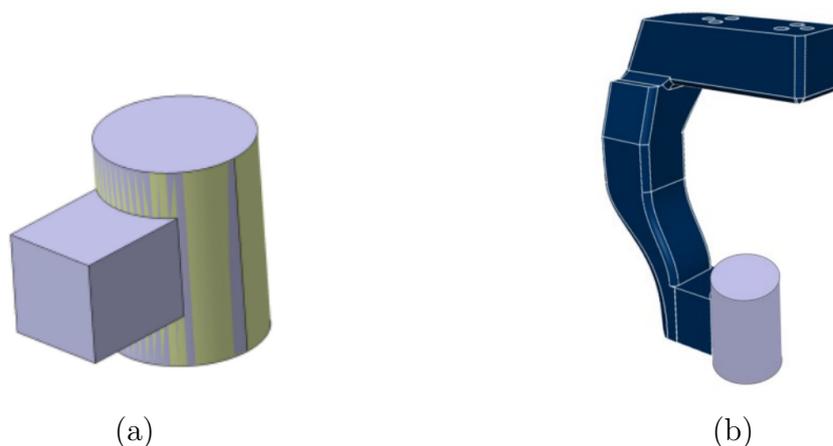


Abbildung 2.5.: Vorgehen für die Greifpunktbestimmung nach [Honarpardaz et al., 2017]. (a) Ableitung der Wirkflächen mittels boolescher Operationen zwischen dem Kontaktstück und dem Bauteil (b) Generierung des geometrisch konformen Endeffektors im **CAD**-Programm basierend auf dem Bauteil und den definierten Randbedingungen.

Form für jeden Griff und erhöht somit die Griffsicherheit. Schmalz et al. [Schmalz et al., 2016] leiten aus den CAD-Daten ebenfalls die Form des Greifers ab und der komplette Greifer wird automatisch generiert, die zulässige Greifkraft abgeschätzt und zwischen dem physikalischen Wirkprinzip unterschieden. Je nach Form des Handhabungsobjektes wird ein Parallelbackengreifer oder Vakuumbreifer eingesetzt. Die initiale Positionierung des Greifers findet durch ein regelbasiertes System statt. Die so generierten Endeffektoren besitzen eine spezielle Konfiguration für ein Bauteil und schränken dadurch die Handhabung weiterer Bauteile hinsichtlich der geometrischen Vielfalt ein. Gerade in Produktionsprozessen mit wechselnden Werkstücken, wie in der Additiven Fertigung (AF), resultiert daraus eine Vielzahl an benötigten unterschiedlichen Endeffektorkonfigurationen.

Sainul et al. [Sainul et al., 2019] projizieren die Kontaktpunkte zwischen dem Greifer und dem Handhabungsobjekt mit Hilfe einer Octree Repräsentation des Greifers auf eine vorher generierte Schnittfläche [Meagher, 1982]. Durch diese Projektion können eine Vielzahl an Kontaktstellen evaluiert werden, sodass keine Idealisierung des Griffes notwendig ist. Aus den Kontaktpunkten können nicht nur größere Kontaktflächen generiert werden, sondern auch die möglichen Kontaktpunkte des Greifers.

Wan et al. [Wan et al., 2019] nutzen ein Set aus überlappenden Oberflächensegmenten und zufällig generierte Kontaktpunkte für die Bestimmung von Greifpositionen. Ausgehend von einem initialen Oberflächensegment werden die benachbarten Segmente anhand ihres Normalenvektors in einer 3D-Fläche gruppiert. Dieses Vorgehen wird iterativ durchgeführt, bis die komplette Objektoberfläche mit äquivalenten Flächen approximiert ist. Anschließend werden zufällig verteilte Punkte auf dem Objekt zu den erstellten 3D-Flächen zugeordnet. Durch eine zweistufige Bereinigung der Punkte in jeder Fläche, stellen die verbleibenden Oberflächenpunkte Kontaktpunkte des Greifers dar. Auf Basis dieser Menge an Flächen und Oberflächenpunkten können für Vakuumbreifer und Parallelbackengreifer geeignete Kontaktpunkte identifiziert werden. Für Vakuumbreifer reicht die Betrachtung einzelner Flächen aus; hingegen müssen bei 2-Finger Greifern antipodale Flächen untersucht werden.

Während die meisten Ansätze darauf ausgelegt sind, ebene Kontaktflächen zu identifizieren oder einen idealisierten Punktkontakt zu finden, können in [Harada et al., 2011] beliebig geformte Kontaktstellen bestimmt werden. Zur Sicherstellung einer übereinstimmenden Form wird eine elastische Schicht an den Kontaktstellen des Endeffektors aufgebracht. Für die Identifikation der Kontaktstellen werden ebenfalls die benachbarten Oberflächensegmente mit einer 2D-Ebene approximiert und bei der Einhal-

tung eines Grenzwertes zu einer Fläche gruppiert. Als Grenzwert dient der orthogonale Abstand zwischen der Ebene und den Oberflächensegmenten, welcher aus der maximal zulässigen Verformung des elastischen Materials resultiert. Aus diesem Set an Flächen können antipodale Partner mittels einer Heuristik bestimmt werden. Ausgehend von den Oberflächenpunkten in der Ebene werden die Schnittpunkte orthogonal verlaufender Vektoren mit anderen Flächen bestimmt und deren Abstand evaluiert.

Li und Pollard [Li et al., 2005] formulieren die Greifpunktbestimmung als partiellen Formabgleich. Ziel ist die Identifikation übereinstimmender Geometrien zwischen der humanoiden Hand und dem Objekt zu finden (siehe Abb. 2.6).

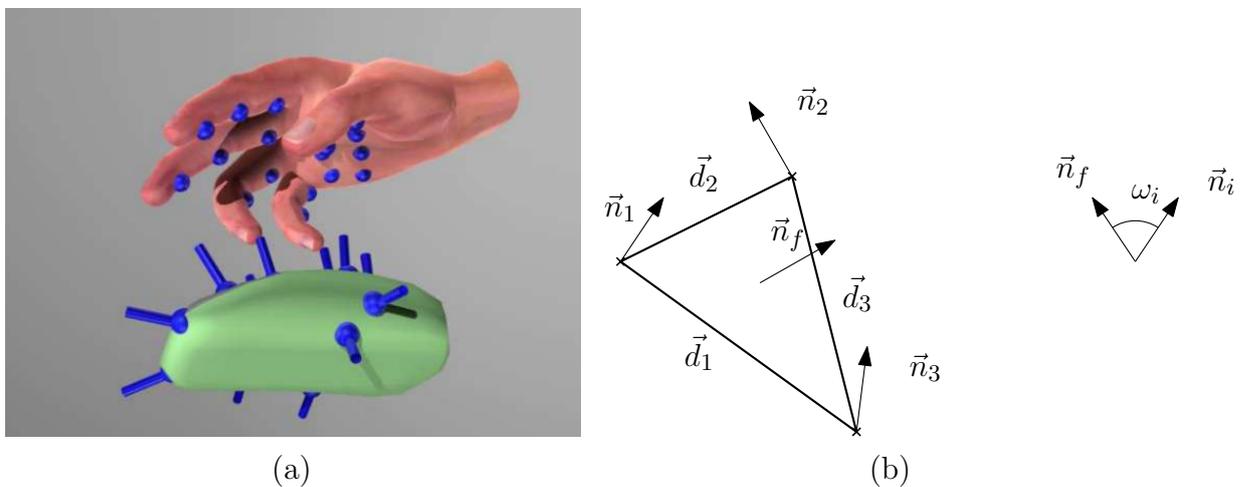


Abbildung 2.6.: Identifikation von Greifpunkten mit einem partiellen Formabgleich [Li et al., 2005]. (a) Identifikation der Kontaktpunkte zwischen dem Endeffektor (humanoide Hand) und einem Objekt (Computer Maus) (b) Darstellung der abgeleiteten Parametern $d_{1,2,3}, \omega_{1,2,3}$ aus dem Hilfsdreieck zur Erstellung des Featuresets.

Als Basis wird ein Set aus konfigurierten Handposen verwendet und für jede Pose eine endliche Menge an Kontaktpunkten erzeugt. In dem zweistufigen Verfahren wird zuerst die Form der Hand evaluiert und anschließend die Orientierung und Ausrichtung bestimmt. Im ersten Schritt wird überprüft, ob die Form der Hand und des Objektes miteinander kompatibel sind, d.h., ob alle Merkmale m der Wirkfläche auf dem Objekt enthalten sind. Für den Abgleich der beiden Geometrien werden sowohl für die humanoide Hand, als auch für das Objekt, Featuresets bestimmt und gegeneinander abgeglichen. Sind alle Features der Roboterhand im Featureset des Handhabungsobjektes enthalten, eignet sich die Pose für das Handhabungsobjekt. Ein Feature beinhaltet drei Einträge und besteht aus dem Abstand $d_1 = P_2 - P_1$ und den Winkeln ω_1, ω_2

zufällig ausgewählten Punktpaaren $\langle P_1, P_2 \rangle$ auf der Oberfläche (siehe Abb. xx). Die Berechnung der Winkel $\omega_{1,2}$ erfolgt jeweils aus dem Normalenvektor des dazugehörigen Punktes \vec{n}_i und der Verbindungslinie des Punktpaares n_{1-2}

$$\omega_i = \arccos \frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_{1-2}}{|\vec{n}_i| \cdot |\vec{n}_{1-2}|}, \text{ mit } i \in [1, 2]. \quad (2.5)$$

Mit diesen Parametern wird ein $m \times 3$ Featureset für die humanoide Hand und ein $n \times 3$ Featureset für das Objekt gebildet. Die Anzahl der Einträge n kann individuell angepasst werden:

$$FS = \begin{pmatrix} d_1 & \omega_1 & \omega_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} . \quad (2.6)$$

Für die dazugehörige Ausrichtung der humanoiden Hand wird eine reduzierte Beschreibung $FS_H^1 \times 3$ generiert und mit einem Featureset des Objektes $FS_O^{\times 3}$ abgeglichen. Als reduzierte Beschreibung eignen sich verschieden geometrische Formen wie bspw.: Linien, Dreiecke, Vierecke, Pyramiden und Hexaeder [Osada et al., 2002]. Für die humanoide Hand wird ein Dreieck $\triangle P_1 P_2 P_3$ (siehe Abb. xx) aus zufällig gewählten Oberflächenpunkten generiert und anschließend ein 6D-Feature erstellt mit drei Längen (d_1, d_2, d_3) - und drei Winkeleinträgen $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$

$$FS = \begin{pmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} . \quad (2.7)$$

Aus den Oberflächenpunkten des Handhabungsobjektes wird eine endliche Anzahl n an Dreiecken generiert und die selben Features bestimmt, wie für das Handhabungsobjekt. Im resultierenden Featureset $H_O^{n \times 6}$ werden die Einträge unter Berücksichtigung von Grenzwerten gefiltert, sodass geeignete Positionierungen der Roboterhand resultieren

$$H_O = FS_O - FS_H, \forall d_1, d_2, d_3 \leq d_{\text{grenz}} \wedge \omega_1, \omega_2, \omega_3 < \omega_{\text{grenz}}. \quad (2.8)$$

2.1.1.3. Hybride Algorithmen

Mit hybriden Algorithmen können zum einen Objekte dynamisch erfasst werden, d.h. eine feste Position der Objekte muss nicht vorgegeben sein. Zum anderen, kann eine umfangreiche Bestimmung und Evaluation der Greifpunkte vorgenommen werden und ist mit den live-Daten eines Greifpunktes kombinierbar. Fine et al. [Fine et al., 2021] nutzen offline generierte Posen, um einen teleoperierten Handhabungsvorgang zu unterstützen.

In einer *MATLAB* Simulation werden zufällige Kontaktpunkte ausgewählt und der Greifraum bestimmt. Liegt ein kraftschlüssiger Griff vor, folgt eine Bewertung der Greifpunkte und die Speicherung in einer Liste an zulässigen Greifpunkten. Anschließend wird mit einem evolutionären Algorithmus [Bartz-Beielstein et al., 2014] die generierte Liste optimiert, um den optimalen Greifpunkt zu bestimmen. Im Vergleich zu den initialen Greifpunkten in der Liste ergeben sich anschließend optimierte Greifpunkte mit der dazugehörigen Qualitätsmetrik. Basierend auf dem offline bestimmten Greifpunkt erfolgt die Unterstützung des Bedieners während der Teleoperation. Aus Sicht der vollständigen Prozessautomatisierung stellt die teleoperierte Handhabung jedoch keine vollständige Lösung dar, sondern entspricht einer Notfalllösung in Spezialfällen.

Zudem können die offline zugewiesenen Daten direkt verwendet werden. Eine Möglichkeit ist die Bestimmung eines Sets an Greifpunkten für ein Objekt und die Transformation dieser Daten mittels einer Objekterkennung und Posenschätzung. Für die Objekterkennung können Feature-basierte Verfahren mit unterschiedlichen Beschreibungen [Wu et al., 2010][Sun et al., 2009], Abstimmungsverfahren [Zeng Wang et al., 2015][Mian et al., 2006], die Repräsentation als angeordnete primitive Objekte [Schnabel et al., 2007] oder Hashtabellen (engl. Hashmaps) [Grewe et al., 1995][Matei et al., 2006][Papazov et al., 2012] eingesetzt werden. Die Transformation kann ebenfalls mittels Hashtabellen [Winkelbach et al., 2006], template-basierten Ansätzen [van Nguyen et al., 2022], einer lokalen Posenbeschreibung [Hu et al., 2018] oder durch einen Abgleich generierter Hauptachsen [Kubus et al., 2007] erfolgen. Kleeberger et al. [Kleeberger et al., 2021a] nutzen Punktwolken, um Punktpaare zu bilden. Jeder Datenpunkt auf dem Objekt wird mit allen anderen Einträgen kombiniert und anhand des Abstandes und der Orientierung der Normalenvektoren klassifiziert (siehe Abb. 2.7). Anschließend erfolgt eine globale Kollisionsüberprüfung, um die Greifpunkte zu validieren. Zur Auswahl eines Griffes während der online-Greifpunktbestimmung wird eine Heuristik [Spenrath et al., 2017] verwendet. Da die globale Kollisionsprüfung nur den Kontakt der Hüllkörper (engl. Bounding Box) evaluiert ist die Betrachtung der resultierenden Kontaktfläche nur eine Approximation und Abhängig von der Güte des Hüllkörpers. Saut und Sidobre [Saut et al., 2012] erstellen hierarchische Modelle sowohl für die Greiferfinger als auch für das Handhabungsobjekt, um Greifkonfigurationen zu identifizieren, und führen eine Posenschätzung durch die Transformation diskretisierter Partikel durch.

Akinola et al. [Akinola et al., 2018] integrieren in der offline-Phase eine zusätzliche Reichweitenanalyse, um den Arbeitsbereich des Roboters bei der Greifpunktbestimmung zu berücksichtigen. Für die Greifpunktbestimmung wird Simulated Annealing [Rozenberg

et al., [2012] verwendet, um ein Minima im aufgespannten Raum aus Endeffektor und Handhabungsobjekt zu bestimmen. Der durchsuchte Raum setzt sich aus den Posen des Endeffektors und den Freiheitsgraden zusammen [Ciocarlie et al., 2007]. Auch hier findet keine detaillierte Betrachtung der Kontaktfläche statt, da die Kontaktstellen als Punktkontakte abgebildet werden.

2.1.2. Empirische Greifpunktbestimmung

Zu den datenbasierten Ansätzen für die Greifpunktbestimmung gehören neben Modellen der Künstlichen Intelligenz (KI) [Ertel, 2021] auch das Programmieren durch vormachen und das Einprogrammieren vordefinierter Positionen. Durch die Festlegung stationärer Punkte beim direkten Vormachen [Park et al., 2011] wird zwar die einfache Programmierung für den Handhabungsprozess ermöglicht, allerdings ist bei variierenden Bauteilpositionen und -geometrien immer eine Rekonfiguration des Roboterprogramms notwendig. Die Playback Programmierung [Riedl et al., 2019] ermöglicht unter Einbindung von Vision Sensoren oder Tracking-Markierungen die Nachbildung ausgeführter Bewegungen. Aufgrund der Gestaltungsfreiheit im [B.] und der daraus entstehenden Produktvielfalt sind statische Verfahren ungeeignet und werden in diesem Abschnitt nicht näher betrachtet.

Im Gegensatz dazu bieten die verschiedenen KI-Methoden (Decision Trees (DT), Support Vector Machine (SVM), Random Forests (RF), Neural Networks (NN), k-Nearest-Neighbor (k-NN), Reinforcement Learning (RL)) [Bonaccorso, July 2017] die Möglichkeit den abgebildeten Prozess zu generalisieren und dynamisch auf Veränderungen zu reagieren. Aus den verfügbaren KI-Methoden werden überwiegend netzbasierte Methoden verwendet. SVM [Pelosof et al., 2004], DT [Fernandez et al., 2004] und RF

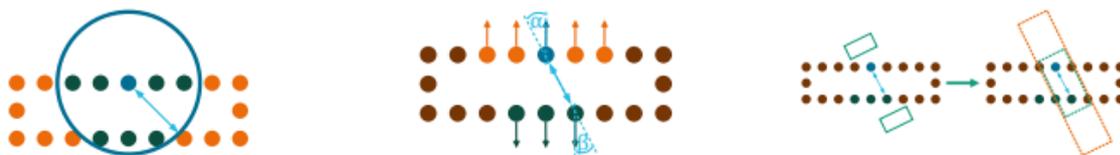


Abbildung 2.7.: Bildung von antipodalen Punktpaaren aus der Punktwolke zur Greifpunktbestimmung [Kleeberger et al., 2021a]. 1. Aufspannen eines Lösungsraums um einen Referenzpunkt 2. Abgleich der Normalenvektoren im Lösungsraum 3. Kollisionsprüfung mit geometrisch einfachen Objekten für den Endeffektor.

[Zhang et al., 2020] werden hingegen nur vereinzelt verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der empirischen Methoden ist zudem in [Bohg et al., 2014][Caldera et al., 2018][Kleeberger et al., 2020b] zu finden, weshalb in diesem Abschnitt nur auf das zugrundeliegende Konzept eingegangen wird.

Grundlage aller überwachten empirischen Modelle ist eine Datenbasis, die a priori erstellt werden muss. Alternativ kann ein vorkonfigurierter Datensatz verwendet werden [University, 2022][Depierre et al., 2018]. Der Datensatz enthält Objekte mit gelabelten Greifpositionen und kann mit beliebigen Metriken erweitert werden. Die überwiegende Darstellung der Datenpunkte innerhalb des Datensatzes erfolgt als RGB-Bild oder Tiefenbild mit annotierten Greifpositionen (siehe Abbildung 2.8). Die Kennzeichnung der Datenpunkte kann manuell durchgeführt werden oder mittels spezifischer Emulatoren (*GraspIt!*, *OpenRAVE*, *Drake*, *Gazebo*, *CoppeliaSim*), in denen der Handhabungsvorgang simuliert wird. Da die entwickelten Modelle mit den bereitgestellten Daten trainiert werden, wird die Modellqualität und -güte entscheidend von der Qualität [Gupta et al., 2020] und dem Umfang [Zhang et al., 2018] der Trainingsdaten beeinflusst.

Wie bei anderen KI-Anwendungen werden auch bei der Greifpunktbestimmung Modelle, Architekturen und mathematische Operatoren verwendet, um eine möglichst hohe Erfolgsquote zu generieren. Für die Beschreibung der mathematischen Grundlagen wird an dieser Stelle auf [Deisenroth et al., 2020][Berner et al., 2021] verwiesen.

Zur Bestimmung der Greifpositionen werden überwiegend Deep-Neural-Networks verwendet. Insbesondere eignen sich CNNs [Mahler et al., 2017][Redmon et al., 2015], da die Faltungsschichten (engl. Convolutional Layers) zusammen mit einem Down-

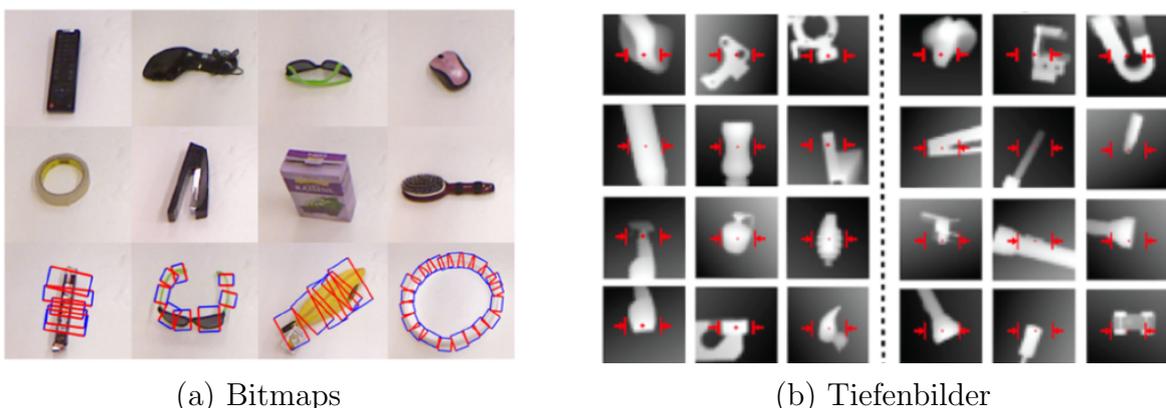


Abbildung 2.8.: Bereitstellung der vorkonfigurierte Greifpositionen in den Trainingsdaten. (a) Darstellung in Bitmaps aus dem Cornell Datensatz [Fernandez et al., 2004] (b) Tiefenbilder (engl. depth images) aus dem Dex-Net Datensatz [Mahler et al., 2017].

sampling (Pooling) die relevanten Entscheidungskriterien extrahieren [Szegedy et al., 2015]. Mit der Pooling Operation wird die räumliche Dimension einer Matrix reduziert. Die individuellen Architekturen variieren je nach Eingangsdaten und Problemstellung, jedoch können für den Ablauf drei übergreifende Schritte (Datenvorverarbeitung, Greifpunktbestimmung und Ausgabe) identifiziert werden. Diese Schritte sind anhand der Architektur von Kumra und Kanan [Kumra et al., 2016] exemplarisch dargestellt (siehe Abb. 2.9). In [Kumra et al., 2016] beinhaltet die Datenvorverarbeitung mit dem *ResNet-50* ein zusätzliches CNN zur Extraktion der Features aus den gegebenen Bilddaten. Anschließend existieren mehrere Schichten zur Bestimmung der Greifpunkte und deren Ausgabe. Ebenfalls kann RL eingesetzt werden, um Greifpunkte zu bestimmen. Be-

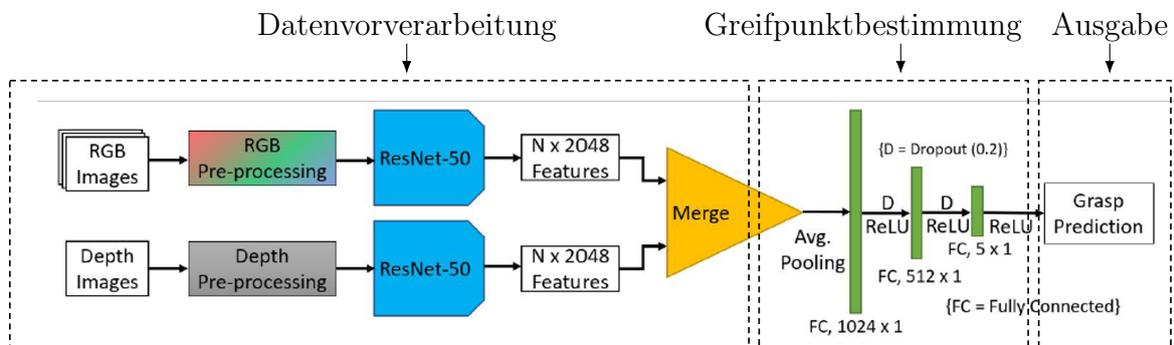


Abbildung 2.9.: Beispielhafte Architektur eines CNN zur Greifpunktbestimmung basierend auf Bilddaten mit den übergreifenden Schritten: Datenvorverarbeitung, Greifpunktbestimmung und Ausgabe. [Caldera et al., 2018] [Kumra et al., 2016]

standteil des RL ist ein Agent, der bei jedem Zeitschritt Δt den aktuellen Ist-Zustand $z_{\Delta t} \in Z$ überwacht, eine Aktion $a_{\Delta t} \in A$ ausführt und dann eine Belohnung $r(z_{\Delta t}, a_{\Delta t})$ erhält. Ziel des Agenten ist eine Strategie zu entwickeln, welche die erwartete Belohnung maximiert

$$\max \mathbb{E}_{z,a} \left[\sum_{\Delta t=1}^t \gamma^{\Delta t-1} r(z_{\Delta t}, a_{\Delta t}) \right], \quad (2.9)$$

wobei $\mathbb{E}_{z,a}$ der totalen Belohnung zum Zeitpunkt t entspricht und γ der Diskontierung zukünftiger Belohnungen ist. Für die Entwicklung dieser Strategie ist eine Entwicklungsumgebung notwendig, in der die Aktionen ausgeführt, überwacht und bewertet werden. In der Greifpunktbestimmung können hierfür Roboter Simulationsumgebungen (*Gazebo*, *Drake*, *CoppeliaSim*) [Orsula et al., 2022]. Ziel des Agenten ist die erfolgreiche Handhabung der Bauteile, für die er eine Belohnung, meist binär, erhält. Neben der Formulierung als Markov-Entscheidungsprozess [Sutton et al., 1998], können

auch Q-Learning [Watkins et al., 1992], Deep Deterministic Policy Gradient [Lillicrap et al., 2015] oder Monte-Carlo-Methoden [Quillen et al., 2018] eingesetzt werden. Durch eine zufällige Positionierung und Variation der Trainingsobjekte in der Entwicklungsumgebung kann der Agent eine generalisierende Strategie erlernen und somit zuvor unbekannte Objekte handhaben. Ziel aller KI-Methoden in der Greifpunktbestimmung ist ein generalisierendes Modell, um zuvor unbekannte Objekte handhaben zu können. Allerdings sinkt die Güte der Modelle bei Objekten, die nicht in den Trainingsdaten enthalten sind [Wu et al., 2023] und erschwert somit den Einsatz in einer industriellen Produktionsumgebung.

2.2. Mechanische Greifpunktbewertung

Die erforderliche Gleichgewichts- und Stabilitätsbedingung kann an mehreren Stellen für die Kombination aus Greifer und Handhabungsobjekt erfüllt werden. Vergleichbar zu Alltagsobjekten weisen die Bauteile mehrere Greifpositionen, sodass die Algorithmen mehrere Einträge im Lösungsraum generieren. Zudem kann die Distanz zwischen den einzelnen Punkten sehr gering sein, sodass Stellen mit einer dichten Anordnung von Greifpositionen entstehen. Für die Selektion und Auswahl eines Griffes aus dem existierenden Lösungsraum ist deshalb ein Ranking der Greifpositionen anhand definierter Bewertungsmetriken (Erreichbarkeit, Griffsicherheit, Bauteilbelastung) [Rubert et al., 2018] notwendig. Üblicherweise werden diese Qualitätskriterien in der Literatur auch als Q-Metriken bezeichnet.

Als Qualitätsmetriken können diese Bewertungsmetriken in eine Vielzahl an Kriterien während des gesamten Handhabungsprozesses unterteilt werden. Eine ausführliche Zusammenfassung dieser Metriken in den unterschiedlichen Zeitpunkten während des Handhabungsvorganges ist in [Roa et al., 2015] zu finden. Entscheidend für die Bauteilentnahme in der industriellen Fertigung ist die sichere und schadensfreie Handhabung der Bauteile. Im [BJ], bei der Handhabung des Grünlings, ist durch die geringe Festigkeit der Bauteile die Betrachtung von Letzterem entscheidend. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt der Fokus auf Verfahren zur mechanischen Bewertung der Greifpunkte gelegt und sowohl auf analytische (siehe Kapitel 2.2.1), als auch auf numerische Verfahren (siehe Kapitel 2.2.2) eingegangen. Der analytische Ansatz resultiert aus der klassischen Maschinenlemente-Theorie [Niemann et al., 2019], hingegen wird bei den numerischen Methoden die Boundary Elemente Methode (BEM) und FEM eingesetzt

um Spannungswerte an jedem Knotenpunkt generieren zu können. Aufgrund der abweichenden Geometrie des Grünlings im Vergleich zum konstruierten **CAD**-Modell ist für beide Methoden ein prozessspezifisches Bauteilmodell (siehe Kapitel **2.2.3**) notwendig.

2.2.1. Analytische Ansätze

Als Maß für die zulässige mechanische Belastung der Handhabungsobjekte verwendet Schmalz [Schmalz, **2018**] die zulässige Flächenpressung. Wird diese Grenze überschritten, können Beschädigungen oder Verformungen am Objekt auftreten [Feldmann et al., **2014**]. Aus [Niemann et al., **2019**] resultiert mit der Streckgrenze R_e des Materials für die zulässige Flächenpressung

$$\sigma_{zul} = \frac{R_e}{1.2}, \quad (2.10)$$

für duktile Werkstoffe und mit der Zugfestigkeit R_m

$$\sigma_{zul} = \frac{R_m}{2}, \quad (2.11)$$

für spröde Werkstoffe. Die resultierende Flächenpressung σ während der Handhabung ergibt sich aus der wirkenden Normalkraft F_N und der Wirkfläche A_W

$$\sigma = \frac{F_N}{A_W}. \quad (2.12)$$

Die so bestimmte Spannung σ stellt nur einen skalaren Wert und eine Abschätzung der mechanischen Belastung dar. Zudem wird bei dieser Betrachtung nicht die gesamte Geometrie des Bauteils betrachtet. Gerade bei additiv gefertigten Bauteilen ist dies allerdings notwendig, da Voronoi-Strukturen und komplexe innere Strukturen (engl. Infill), in den Bauteilen enthalten sind.

2.2.2. Numerische Methoden

Pan et al. [Pan et al., **2020**] verwenden die **BEM** zur Berechnung von Oberflächenspannungen während des Handhabungsprozesses. Mit dem generierten Qualitätskriterium Q_{SM} ist eine Optimierung der Spannungsverteilung am Handhabungsobjekt möglich. Die berechneten Spannungen σ aus der **BEM** ergeben zusammen mit dem *wrench space* den Q_{SM} -Wert. Mit der **BEM** [Fenner, **1983**] werden für n triangulierte Flächen auf der Objektoberfläche und k externen Kräften, n stückweise konstante Spannungswerte

an den Flächenschwerpunkten $s_{i,\dots,n}$ generiert

$$\begin{pmatrix} \sigma_x(s_j) \\ \sigma_y(s_j) \\ \sigma_z(s_j) \end{pmatrix} = A_j \begin{pmatrix} g_0 \\ [\nabla g]_x \\ [\nabla g]_y \\ [\nabla g]_z \end{pmatrix} + B_j \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_k \end{pmatrix} \quad \forall j = 1, \dots, n, \quad (2.13)$$

wobei f_k die externen Kräfte in den Kontaktpunkten beschreibt und g die wirkende Körperkraft als Volumenkraft. Die Volumenkraft $g(s)$ wird als lineare Funktion in Abhängigkeit der Kontaktpunkte/Flächenschwerpunkte s_i formuliert

$$g(s) = g_0 + \nabla g \cdot s, \quad (2.14)$$

mit einem konstanten Term g_0 und der räumlichen Ableitung ∇g . Die Matrizen A_j und B_j in [2.13](#) repräsentieren dicht besetzte Matrizes und können aus der Objektgeometrie bestimmt werden. Eine detaillierte Formulierung und Herleitung von A_j und B_j ist in [Pan et al., [2020](#)] gegeben.

Für die zulässige Spannung gilt als Bedingung

$$\forall \|d\| = 1, j = 1, \dots, n : -\sigma_{max} \leq s^T \sigma(s_j) d \leq \sigma_{max} \quad (2.15)$$

mit der Richtung d und der maximal zulässigen Spannung σ_{max} . Bei duktilen Materialien entspricht der maximale Spannungswerte σ_{max} der Zugfestigkeit R_m und bei spröden Materialien der Streckgrenze R_e . Unter dieser Voraussetzung formulieren [Pan et al., [2020](#)] die Qualitätsmetrik Q_{SM} als globales Optimierungsproblem:

$$Q_{SM} \leq \min_{d, \|d\|=1} \max_{w \in \sqrt{\mathbb{W}\mathbb{W}}} w^T d. \quad (2.16)$$

Dharbaneshwer et al. [Dharbaneshwer et al., [2021](#)] stellen eine Anleitung (siehe Abb. [2.10](#)) für die manuelle Finite Elemente Analyse ([FEA](#)) von Handhabungsobjekten vor.

Basierend auf den CAD-Modellen des Endeffektors und des Handhabungsobjektes werden beide Domänen vernetzt und anschließend die Materialparameter spezifiziert. Nach der Identifizierung der Greifpunkte und Positionierung des Endeffektors kann die Interaktion in der Kontaktfläche spezifiziert werden. Als mathematisches Modell für die Druckverteilung wird eine exponentielle Druckverteilung für nachgiebige Materialien

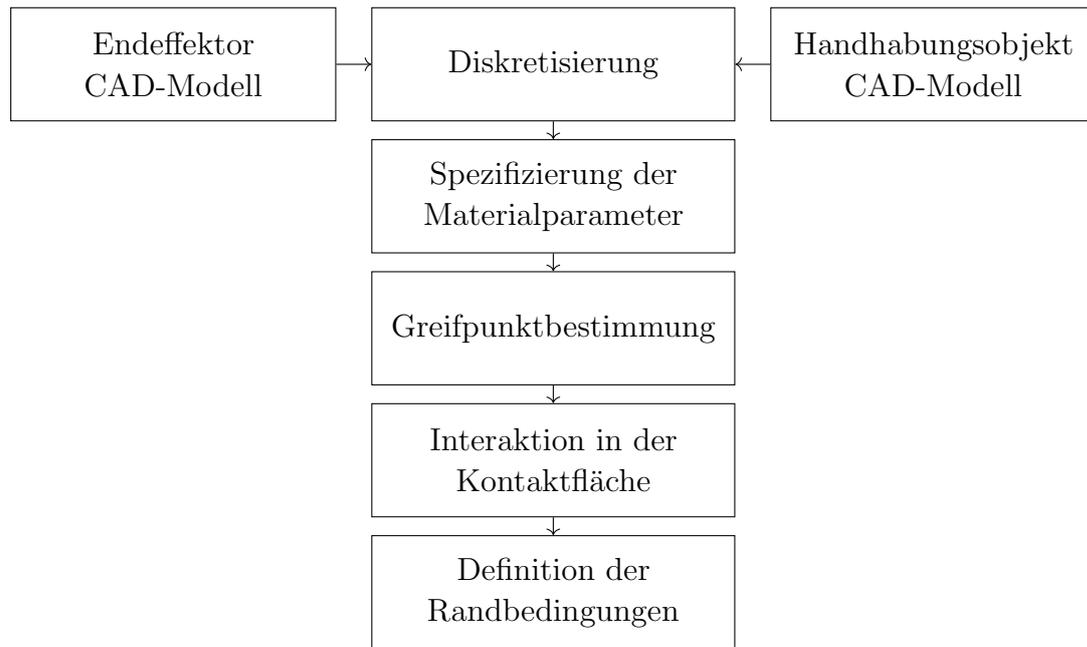


Abbildung 2.10.: Prozessschritte für die manuelle **FEM** im Handhabungsprozess nach [Dharbaneshwer et al., 2021]. Ausgehend von den **CAD**-Modellen des Greifers und des Endeffektors erfolgt die Diskretisierung der Domäne sowie die Spezifizierung der Materialparameter. Im Anschluss an die Greifpunktbestimmung wird die Interaktion in der Kontaktfläche definiert und anschließend die Randbedingungen festgelegt.

verwendet [Smith, 2014]:

$$p(h) = \frac{p_0}{\exp(1) - 1} \left[\left(\frac{h}{c_0} + 1 \right) \left(\exp \left(\frac{h}{c_0} \right) - 1 \right) \right], \quad (2.17)$$

wobei h der Abstand zwischen den Kontaktflächen ist, p^0 dem Druck bei vollem Kontakt entspricht und c^0 der Grenzwert für den Abstand, ab dem p null wird, ist (siehe Abb. 2.11).

Einen simulativen Ansatz, gestützt durch eine **FEA**, verwenden Zaidi et al. [Zaidi et al., 2017] für die mechanische Bewertung von Greifpunkten deformierbarer Handhabungsobjekte. Nach der Identifikation geeigneter Kontaktpaare durch eine inkrementelle Verschiebung der Greiferfinger in der Simulationsumgebung erfolgt eine Analyse der mechanischen Belastung infolge der aufgetragenen Kräfte an den Kontaktpunkten. Als Endeffektor dient eine menschenähnliche Hand mit elastisch verformbarem Material an den Wirkflächen, sodass während der Handhabung kreisförmige oder elliptische Kontaktflächen entstehen. Zur Identifizierung der Kontaktbereiche und damit der Netz-elemente (Knoten), an denen die externen Kräfte F_k angreifen erfolgt eine geometrische

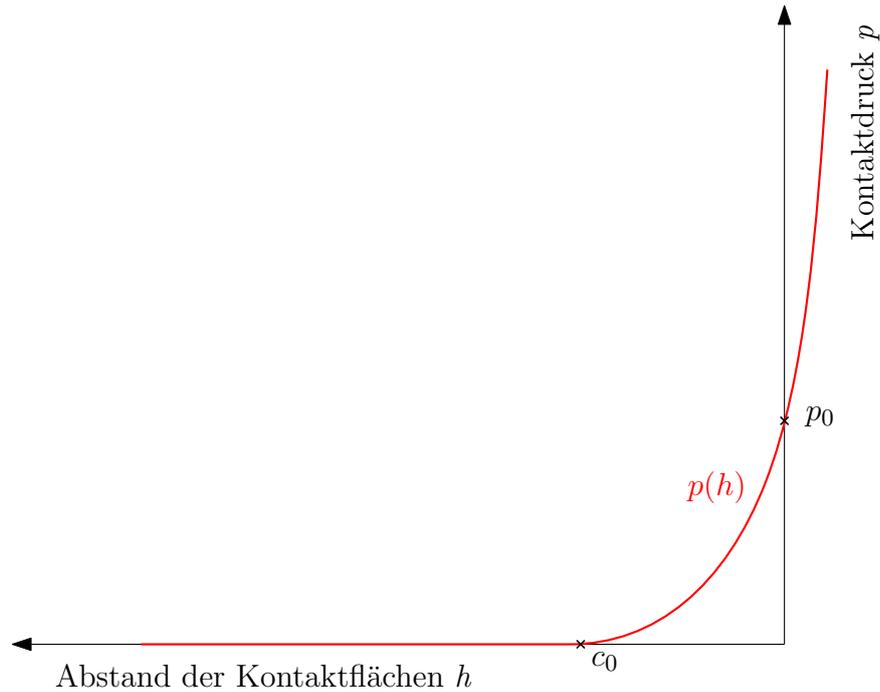


Abbildung 2.11.: Exponentielles Verhalten des Kontaktdrucks p gegenüber dem Abstand beider Kontaktflächen h [Boulbes, 2020].

Überprüfung der Oberflächenelemente (siehe Abb. 2.12). Die Abplattung der Kontaktstellen am Endeffektor wird durch einen Kreis mit Kontaktmittelpunkt P_{ci} und dem Radius r abgebildet. Anschließend erfolgt die Projektion des Punktes P_{ci} auf ein selektiertes Oberflächendreieck P_{pj} mit Hilfe des Normalenvektors \vec{n}_{f_i} . Für die Einteilung des Dreiecks als Kontaktfläche gelten zwei Kriterien:

- Der Abstand d_j zwischen dem Kontaktmittelpunkt P_{ci} und dessen Projektion P_{pj} muss geringer sein als der Radius r_{grenz} .
- Der projizierte Punkt P_{pj} muss innerhalb des selektierten Oberflächendreiecks j liegen.

Sind beide Kriterien erfüllt, repräsentiert das Oberflächendreieck eine Kontaktfläche des Kontaktpunktes.

An dem selektierten Oberflächendreieck j wird die Kontaktkraft F_{pj} auf die drei Knotenpunkte mit aufgeteilt. Für die Kräfte an den Knotenpunkten F_l gilt die lokale Gleichgewichtsbedingung

$$F_{pj} = \sum_{l=1}^3 F_l. \quad (2.18)$$

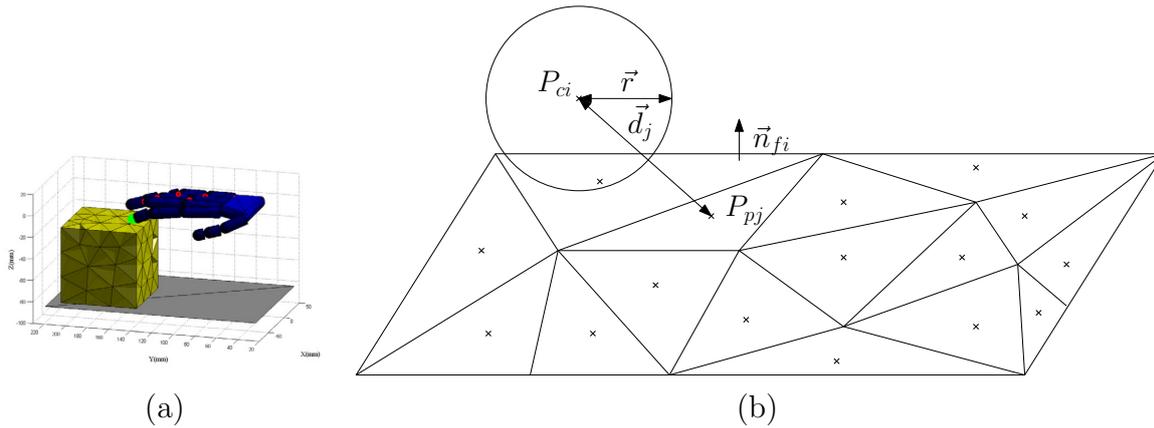


Abbildung 2.12.: Identifikation der Randbedingungen nach [Zaidi et al., 2017]. (a) Markierung der Kontaktstelle (b) Kreisförmiges Hilfsobjekt zur Bestimmung der Kontaktpunkte an der Objekt Oberfläche.

Als Formfunktion verwenden [Zaidi et al., 2017] lineare Funktionen

$$H^T \cdot F_{pj} = F_l, \quad (2.19)$$

mit der Matrix

$$H = \begin{bmatrix} \frac{A_1}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_2}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_3}{A_G} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_1}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_2}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_3}{A_G} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_1}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_2}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_3}{A_G} \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Die Gesamtfläche des Dreiecks A_G wird zur Bestimmung der linearen Formfunktion mit Hilfe des Punktes P_{pj} in drei Teilflächen $A_i (i = 1, 2, 3)$ unterteilt. Aufgrund der Repräsentation des Endeffektors als idealisierte Punkte P_{ci} und deren Projektion P_{pj} wird die Kontaktfläche nicht exakt abgebildet, sondern ist abhängig von der Übereinstimmung der tatsächlichen Geometrie zur angespannten Sphäre.

Huang et al. [Huang et al., 2022a] verwenden zur Bestimmung der mechanischen Belastung deformierbarer Objekte, die Grafikprozessor (engl. Graphics Processing Unit) (GPU) basierte Simulationsumgebung *Isaac Gym* [Makoviychuk et al., 2021]. Im Gegensatz zu [Zaidi et al., 2017] wird nicht nur der statische Anwendungsfall, die Kompression des Objektes, sondern auch eine dynamische Evaluation der Objekte, während der Bewegung vorgenommen. Zusätzlich betrachtete Szenarien sind die Neuausrichtung des Endeffektors (90) eine lineare Beschleunigung und die kreisförmige Rotation des Objektes. Die Aufbringung der geometrischen und mechanischen Randbedingungen wird durch das integrierte Physikmodul (*Nvidia Flex* [Collins et al., 2021]) gesetzt.

Damit aus den Verschiebungen und Dehnungen Spannungen berechnet werden können, wird nach dem Hookeschen Gesetz im 1D-Fall das E-Modul benötigt und im generalisierten mehrdimensionalen Fall, die Elastizitätsmatrix C mit der *Voigtschen* Notation [Gross et al., 2017]

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Die Elastizitätsmatrix besitzt eine Hauptsymmetrie, weswegen für die Komponenten gilt $C_{ij} = C_{ji}$. Zur Berechnung der Komponenten C_{ij} werden charakteristische Materialkennwerte (E-Modul E , Schubmodul G und Querkontraktion ν) benötigt. Je nachdem, ob ein Material isotrope oder anisotrope Eigenschaften besitzt, reduzieren sich die unabhängigen Komponenten in C und somit auch die Anzahl an benötigten Materialkennwerten [Rösler et al., 2012].

Mit dem Ziel, den technologischen Reifegrad des **BJ** zu erhöhen, fokussieren [Rishmawi et al., 2018] [Kumar et al., 2017] [Bafaluy Ojea et al., 2023] die Messung und Modellierung der resultierenden Materialdichte ρ . Der Effekt unterschiedlicher Produktionsparameter auf die mechanischen Eigenschaften des Bräunlings wird in [Miyanaaji et al., 2020] [Zhou et al., 2015] dargestellt. Jedoch werden dort die Eigenschaften des Grünlings nicht betrachtet. In [Enneti et al., 2019] [Mao et al., 2021] [Zhang et al., 2021b] [Diener et al., 2023] werden experimentell die Materialkennwerte des Grünlings mit dem Zug-, Druck- und Biegeversuch bestimmt. In den Messungen wird allerdings keine Richtungsabhängigkeit der gedruckten Probenkörper betrachtet und von einem isotropen Material ausgegangen. Durch die Orientierung der Pulverpartikel und die Auftragsrichtung des Bindemittels resultiert im **BJ** jedoch ein anisotropes Materialverhalten [Li et al., 2020]. Bestätigt wird das anisotrope Materialverhalten in [Cabo Rios et al., 2022] und [Zago et al., 2021], allerdings liegt hier der Fokus auf einer analytischen Modellierung der Bauteilabmessungen nach dem Sintern. Während Hamano et al. [Hamano et al., 2021] die anisotropen Materialparameter nach dem Sintern mit dem Druckversuch bestimmen, wird in [Oh et al., 2019] [Mariani et al., 2020] durch einen 3-Punkt Biegeversuch das E-Modul parallel E_{\parallel} sowie senkrecht zur Druckkopfbewegung E_{\perp} gemessen. Die Prüfverfahren zeigen unterschiedliche Werte für E_{\parallel} und E_{\perp} weshalb die Annahme eines transversal isotropen

Materialverhaltens durch die Ergebnisse bestätigt wird. Die Versuchsergebnisse in [Oh et al., 2019] und [Mariani et al., 2020] stellen jedoch nicht genügend Parameter zur Verfügung für die Modellierung eines transversal isotropen Materials.

2.2.3. Prozessspezifisches Bauteilmodell

Unabhängig von der Wahl des Verfahrens zur mechanischen Greifpunktbewertung ist immer ein prozessspezifisches Bauteilmodell notwendig, denn durch den additiven Fertigungsprozess weichen sowohl die Außenmaße als auch die inneren Strukturen vom konstruierten **CAD**-Teil ab. Im Gegensatz zum **MEX**-Verfahren (Vor Einführung der **ASTM** 52900 wurde der Prozess als Fused Depositon Modelling (FDM) bezeichnet) werden keine Stützstrukturen benötigt, allerdings entsteht im **BJ** eine prozessbedingte Schrumpfung der Bauteile während der Fertigung. Zusätzlich wird im Inneren der Bauteile eine individuell auswählbare Füllstruktur generiert.

Klassische Methoden nutzen Computer Tomographie (**CT**) Scans [Ferrano et al., 2023] zur Rekonstruktion des Bauteils und liefern eine detailgetreues Abbild der Oberfläche. Yanamandra et al. [Yanamandra et al., 2020] nutzen **CT**-Daten gekoppelt mit Machine Learning (**ML**)-Methoden um die Objekte im Materialextusion (engl. material extrusion) (**MEX**)-Verfahren nachzubilden. Weitere Methoden zur 3D-Rekonstruktion basieren auf der Streifenlichtprojektion [Wang et al., 2021][Krznar et al., 2016] oder dem Einsatz von 2D-RGB-Daten während des additiven Fertigungsprozesses [Andersen et al., 2013]. Notwendig für den Einsatz dieser Methoden ist ein physisches Bauteil zur Reproduktion der Daten. Ebenfalls erschwert ist die Darstellung innenliegender Strukturen, da diese bei geschlossenen Bauteilen nicht von den Vision Sensoren detektierbar sind.

Ebenfalls bestehen Ansätze des Reverse Engineering, um aus den Daten zur Maschinen- und Anlagendatensteuerung, Bauteildaten zu generieren. Basierend auf dem *G-Code*, zur Steuerung der **MEX**-Anlage, extrahieren [Bacciaglia et al., 2023][Gleadall et al., 2018][Ueng et al., 2018] aus dem Werkzeugpfad die tatsächliche Geometrie des Bauteils. **BJ**-Anlagen nutzen zur Maschinensteuerung Bitmaps, weshalb die Modelle nicht übertragbar sind. Pixelbasierte Verfahren [Doubrovski et al., 2015] beschränken sich bisher auf die Rekonstruktion der Objektoberfläche ohne eine Darstellung der innenliegenden Struktur.

2.3. Automatisierte Systeme zur Bauteilentnahme in der additiven Fertigung

Aktuell existiert kein komplett automatisiertes System zur Bauteilentnahme im [B.J]. Im Gegensatz dazu existieren in anderen additiven Fertigungsverfahren bereits vollautomatisierte System zur Bauteilhandhabung. Die bestehenden Komplettlösungen zur automatisierten Bauteilentnahme in der [AF] können in zwei Kategorien unterteilt werden. Sowohl Systeme, die zusätzliche Apparaturen und Trägerkonzepte einsetzen (siehe Kapitel 2.3.1), als auch Konzepte ohne Hilfsobjekte (siehe Kapitel 2.3.2).

2.3.1. Trägerkonzepte und zusätzlich gedruckte Hilfsgeometrien

Zur Sicherstellung eines automatisierten, durchgängigen und zuverlässigen innerbetrieblichen Materialfluss eignen sich Trägerkonzepte, um die gedruckten Bauteile zwischen den einzelnen Arbeitsstationen zu transportieren [Fottner et al., 2022].

Nach [Schlick et al., 2014] ist der Werkstückträger definiert als Aufbau aus Platten und Trägerlementen in Transfersystemen, auf denen ein Bauteil (Druckerzeugnis) den Produktionsprozess durchläuft. Ziel ist es, den Werkstückträger so zu gestalten, dass dieser für mehrere Prozessschritte verwendet werden kann und somit entlang der gesamten Prozesskette einsetzbar ist. Für den Einsatz in der additiven Fertigung müssen Trägerkonzepte besonderen Anforderungen (Handhabung, Genauigkeit) entsprechen, da sie zum einen für ein breites Bauteilspektrum ausgelegt sein müssen und gleichzeitig die einzelnen Produktionsschritte nicht beeinflussen dürfen. Wenn möglich, soll der Werkstückträger auch wiederverwendbar sein.

Der Bauraum selbst der [AF]-Anlage kann portabel ausgelegt sein und somit als Werkstückträger dienen [Ambriz et al., 2017]. Wollbrink et al. [Wollbrink et al., 2020b] verwenden eine Substratplatte, damit [PBF]-gefertigte Teile in weiteren Prozessschritten, insbesondere in subtraktiven Fertigungsverfahren, bearbeitbar und transferierbar sind. Neben den prozessunabhängigen Anforderungen ergeben sich für das [PBF]-Verfahren fertigungsspezifische Anforderungen:

- Thermische Widerstandsfähigkeit ($\geq 800^{\circ}\text{C}$) aufgrund der vorherrschenden Bedingungen in der Druckkammer. Erfolgt eine thermische Nachbehandlung (Spannungsarmglühen, homogenisieren) können sich die kritischen Temperaturen erhöhen.
- Mechanische Widerstandsfähigkeit gegenüber Abrasion und Adhäsion durch die Pulverpartikel ($10 - 60\mu\text{m}$).

Aus den Anforderungen resultiert ein Werkstückträger mit einem mehrschichtigen Aufbau (siehe Abb. 2.13). Als unterste Schicht dient eine Basisplatte¹, an der ein Nullpunktspannsystem angebracht ist, mit der das System auf unterschiedlichsten Anlagen fixiert werden kann. Darüber befindet sich eine interne Spannvorrichtung, bestehend aus einer Platte mit Spannhülsen und der Spannplatte, in der die zylinderförmigen Pins eingesetzt werden. Abschließend ist eine Substratplatte aufgebracht, auf der das Bauteil gefertigt wird. Alternativ zum Trägerkonzept können während des

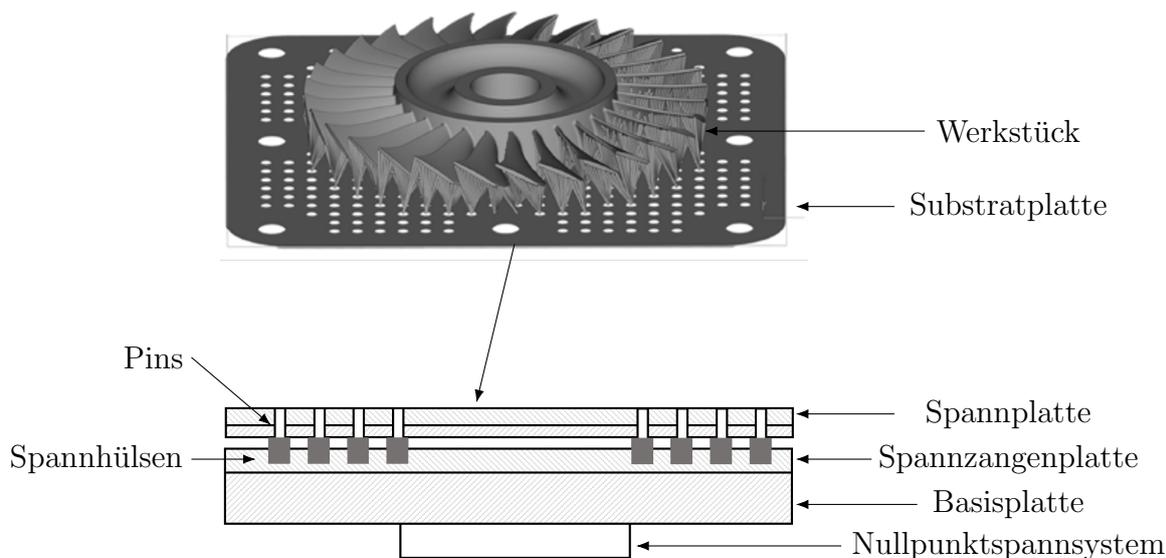


Abbildung 2.13.: Schichtweiser Aufbau eines Werkstückträgers mit Substratplatte für das PBE-Verfahren nach [Wollbrink et al., 2020b].

additiven Fertigungsprozess zusätzliche Hilfsobjekte an das Bauteil gedruckt werden, welche die Handhabung, die Positionierung und die Sicherung in den nachfolgenden Prozessschritten ermöglichen [Horstkotte et al., 2021]. Als Hilfsobjekt können Laschen mit planparallelen Flächen dienen, die am Objekt angebracht sind. Die Positionierung der Laschen ist so zu wählen, dass keine Funktionsflächen beeinträchtigt werden und das zusätzliche Material wieder entfernt werden kann. Zudem besteht die Möglichkeit Spannelemente (Spannstifte, Zylinderstifte und Hülsen) im Entwicklungsprozess am CAD-Teil mit zu konstruieren [Ferchow et al., 2022]. Während des Produktionsprozesses werden diese Komponenten mitgefertigt und in den weiteren Produktionsschritten (CNC-Bearbeitung, Reinigung, Qualitätskontrolle, etc.) zur Sicherung des Bauteils verwendet. Voraussetzung für die Anbringung solcher Hilfsgeometrien ist ein stabiler

¹Als Plattenmaterial wird ein nichtrostender, hitzebeständiger ferritische Chrom-Stahl AISI 446 ($X10CrAl25$) verwendet, mit einer thermischen Beständigkeit bis $\approx 1150^\circ\text{C}$ [Edelstahl, 2023]

und ausreichend genauer Fertigungsprozess, da die Sicherungs- und Positionierelemente keine Fehlstellen beinhalten dürfen und gleichzeitig eine hohe Genauigkeit aufweisen müssen [Wollbrink et al., 2020a].

Zusätzlich verwendete Trägerkonzepte (Platten) und hinzugedruckte Hilfsgeometrien (Laschen, Spannelemente) müssen anschließend wieder entfernt werden und verlangsamten so den Produktionsprozess [Hällgren et al., 2016]. Verbleiben die zusätzlichen Elemente, entfällt dieser Prozessschritt, jedoch resultiert bei der Herstellung des Bauteils durch das zusätzlich einzubringende Material eine längere Fertigungszeit.

2.3.2. Systeme ohne zusätzliche Trägerkonzepte und Hilfsgeometrien

Systeme, die weder Trägerkonzepte noch Hilfsgeometrien zur automatisierten Bauteilhandhabung verwenden, existieren bereits für das MEX-Verfahren. Die MEX-Anlagen weisen häufig eine offene Bauform auf, weshalb die gedruckten Bauteile für externe Systeme zugänglich sind. Im Bereich des BJ fokussieren bisherige Anlagen die automatisierte Entpulverung nach dem Drucken.

2.3.2.1. Automatisierte Bauteilentnahme im MEX

Direkte Lösungen für die automatisierte Bauteilentnahme in der additiven Fertigung existieren für das MEX-Verfahren. Arcoa et al. [Aroca et al., 2017] einen adaptiven Endeffektor um ohne dedizierte Greifpunktbestimmung Bauteile direkt von der Bauplatte zu entnehmen. Anhand der Hüllgeometrie wird das Bauteil umschlossen und gehandhabt. Das System ist allerdings nur für Acryl-Butadien-Styrol (ABS)-Bauteile geeignet, da diese niedrige Adhäsionen mit der Bauplatte aufweisen. Becker et al. [Becker et al., 2019] nutzen einen spezifischen Endeffektor für das MEX-Verfahren. Ausgehend von einer Analyse bestehender 3D-Datensätze aus der online-Datenbank Thingiverse [Thingiverse 2023] wird die geometrische Verteilung der 3D-Modelle bestimmt und daraus die geometrischen Spezifikationen des Greifers abgeleitet. Durch diese Analyse wird sichergestellt, dass ein Endeffektor für ein möglichst breites Bauteilspektrum einsetzbar ist. Die Bestimmung der Greifpunkte für das jeweilige Objekt basiert auf dem generierten *G-Code* [Latif et al., 2021]. Der *G-Code* wird im Präprozessor nach dem Slicing der Bauteile generiert und als Programmiersprache zur Steuerung der Anlagenparameter verwendet. Mit dieser Datengrundlage wird die Positionierung und Orientierung des Bauteils auf der Grundplatte bestimmt und anschließend ein Greifpunkt identifiziert.

Die Greifpunktbestimmung des Systems basiert nicht auf einer detaillierten Greifpunktbestimmung, sondern zielt darauf ab, das Objekt zu umschließen. Hierfür werden aus dem *G-Code* die Abmaße der gedruckten Bauteile abgeleitet. Die Adaption des Endeffektors und Verteilung der Greifkräfte auf das Handhabungsobjekt wird über eine nachgiebige Kontaktfläche am Endeffektor sichergestellt. Nach Abschluss des additiven Fertigungsprozesses wird das Bauteil aus der Anlage entnommen und muss dafür von der Grundplatte gelöst werden. Prozessspezifisch entstehen im **MEX**-Verfahren, beim Erstarren des Druckmaterials auf der Grundplatte, Adhäsionskräfte zwischen den beiden Komponenten. Bei der Entnahme müssen diese vom Entnahmesystem (Roboter) überwunden werden, ohne das Bauteil zu beschädigen. Hierfür leiten die Autoren insgesamt vier Entnahmestrategien für das **MEX**-Verfahren (siehe Abb. 2.14) ab. Mögliche Lösungen stellen eine translatorische Bewegung (z -Achse) und die Rotation um die Einheitsvektoren des x, y, z -Koordinatensystems dar.

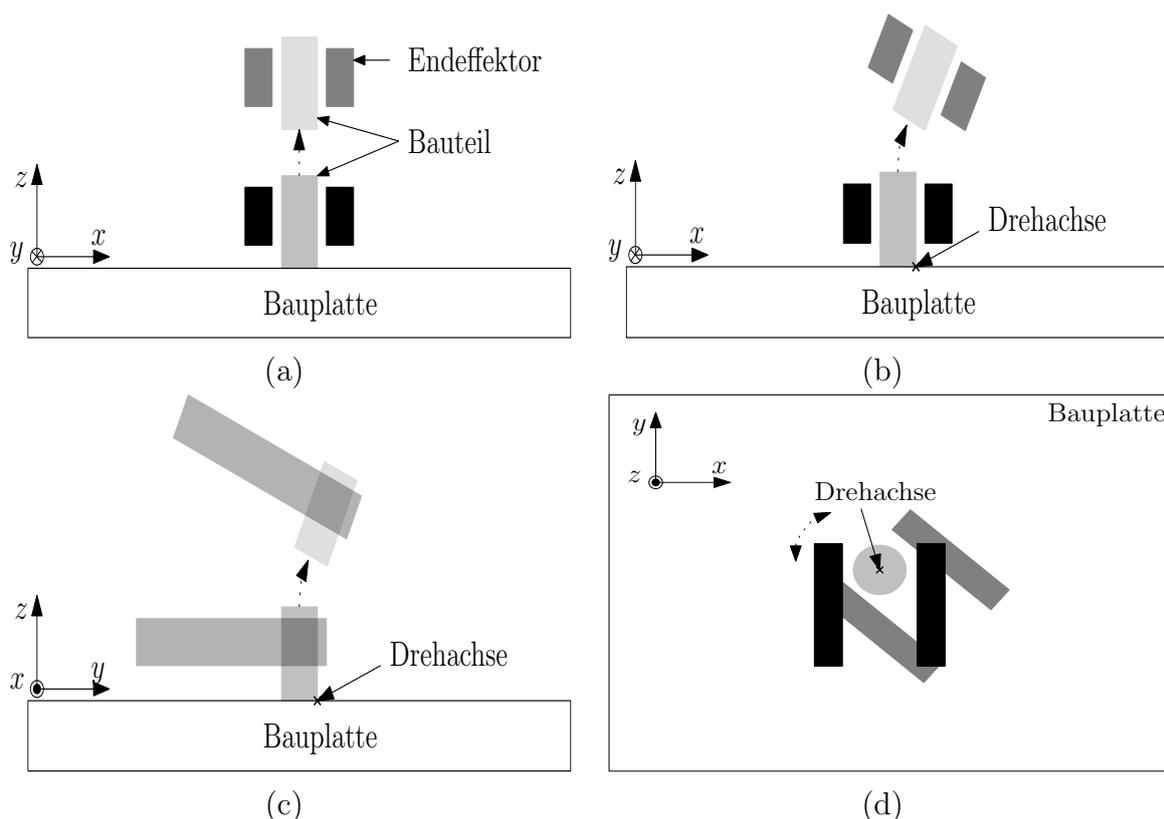


Abbildung 2.14.: Strategien zur Bauteilentnahme im **MEX**-Verfahren nach [Becker et al., 2019]. (a) vertikale Entnahme entlang der z -Achse (b) Rotation um die y -Achse (c) Rotation um die x -Achse (d) Rotation um die z -Achse.

Da die Adhäsionskräfte proportional zur Kontaktfläche sind, muss dies bei der Ausle-

gung des Entnahmesystems berücksichtigt werden. Hierzu zählt neben der erforderlichen Greifkraft am Endeffektor auch eine Berücksichtigung der zulässigen Traglast des Roboters.

Wiedholz et al. [Wiedholz et al., 2021] verwenden einen vergleichbaren Ansatz wie in [Becker et al., 2019] für das MEX-Verfahren. Das System basiert ebenfalls auf dem *G-Code*, um die Position und Orientierung des Bauteils in der Anlage zu bestimmen. Allerdings wird eine detaillierte Greifpunktbestimmung verwendet. Greifpunkte werden mit *GraspIt!* bestimmt und anschließend simulativ deren Erreichbarkeit in der Anlage evaluiert.

2.3.2.2. Konzepte zur Pulverentfernung im BJ

Spezifisch für das BJ existieren Systeme zur automatisierten Entpulverung der Bauteile, die in Kombination mit einem Handhabungssystem für die automatisierte Entnahme eingesetzt werden können. Ein kombiniertes System aus zwei optischen Messsystemen und einem Roboter mit integriertem Absaugstutzen als Endeffektor verwenden [Liu et al., 2022]. Mit den Kameras erfolgt die Aufnahme der Umgebung und die 6D-Posenbestimmung der Bauteile anhand der Bauteilkonturen im Pulverbett. Mit den 3D-Scans aus den Kameradaten und dem initialen CAD-Modell wird in einem iterativen Prozess zunächst die Objektpose geschätzt und anschließend der Roboterpfad für die Entpulverung geplant. Die Transformation zwischen den einzelnen 3D-Scans wird mittels des ICP-Algorithmus durchgeführt. Anders als bei der klassischen Anwendung des ICP wird als Referenz nicht das CAD-Modell verwendet, sondern der 3D-Scan aus der vorangegangenen Iteration. Durch das sequentielle Update des Templates für den ICP-Algorithmus kann das System dynamisch auf Lageveränderungen der Objekte reagieren.

In [Borg, 06.2022] liegt der Fokus auf der konstruktiven Gestaltung des Systems zur Pulverentfernung um die Bauteile herum. Das resultierende Absaugsystem kann auf die Bauplatte aufgesetzt werden und die ungebundenen Pulverpartikel durch einen Luftstrom entfernen.

Neben den wissenschaftlichen Lösungen wird an dieser Stelle auch auf ein bereits existierendes industrielles System eingegangen. Das *DPS 1000* System (siehe Abb. 2.15) der Firma *Digital Metal* entfernt ungebundenes Pulver mit Druckluft durch eine Düse. Als Basis für die Anlage dient eine CNC-Maschine mit einer portablen Werkzeugaufnahme, die für das Entpulvern umgerüstet wird.

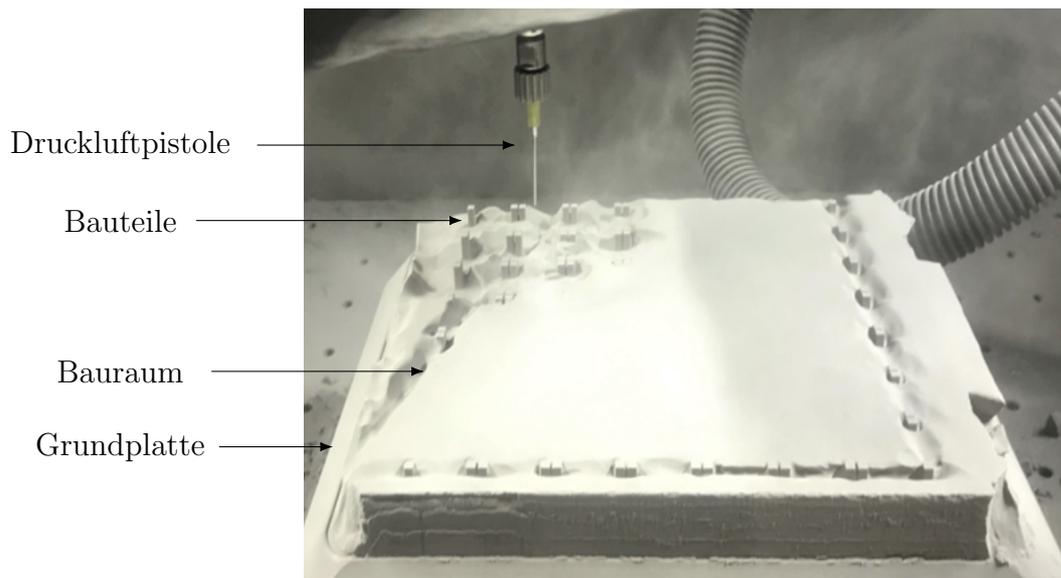


Abbildung 2.15.: Pulverentfernung nach dem additiven Fertigungsprozess mit der *DPS 1000* von *Digital Metal* und den einzelnen Komponenten *Digital Metal DPS 1000* [2020].

2.4. Ableitung des wissenschaftlichen Handlungsbedarfs

Die bestehenden Lösungen für einen automatisierten Materialfluss im **BJ** fokussieren sich auf eine automatisierte Pulverentfernung und -rückgewinnung nach dem Druck der Bauteile. Eine automatisierte Bauteilhandhabung ist in diesen Systemen bisher nicht integriert. Gleichmaßen lassen sich Lösungen aus anderen **AM**-Verfahren nicht direkt übertragen. Generell wird angestrebt, Trägerkonzepte und hinzugedruckte Profile zu vermeiden, da diese den Fertigungsprozess verzögern und für eine große Variantenvielfalt adaptiert werden müssen. Gegenüber dem **MEX**-Verfahren besteht nicht nur eine veränderte Datengrundlage, sondern auch eine erschwerte Zugänglichkeit der Bauteile im Bauraum. Durch das umgebende Pulver sind die Bauteile für Vision Sensoren initial nicht detektierbar. Konzepte ohne detaillierte Greifpunktbestimmung und Bewertung eignen sich ebenfalls nur bedingt, da die Grünlinge eine geringe Festigkeit aufweisen. Abgeleitet aus dem Stand der Technik resultieren drei Forschungsschwerpunkte, die notwendig sind für die Sicherstellung eines automatisierten Materialflusses:

- F1 Greifpunktbestimmung
- F2 Mechanische Greifpunktbewertung
- F3 Kontextbasierte Selektion der Greifpunkte

Ausgehend von den bereitgestellten **CAD**-Modellen im STL-Format werden zunächst Greifpunkte bestimmt (siehe Kapitel **2.4.1**) und anschließend bewertet (siehe Kapitel **2.4.2**), um eine qualitative Selektion vorzunehmen. Diese Daten sind allerdings nicht ohne Transformation und Adaption direkt nutzbar, da im Präprozessor des **BJ** eine individuelle Positionierung erfolgt. Hierfür werden die Daten zunächst digital rekonstruiert und in das Produktionssystem eingebunden (siehe Kapitel **2.4.3**). Aus den betrachteten Forschungsarbeiten ergibt sich folgender Forschungsbedarf in den abgeleiteten Themenfeldern.

2.4.1. Greifpunktbestimmung

Aus dem Stand der Technik (siehe Kapitel **2.1.1**, **2.1.2**) gehen verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Greifpunkten hervor. Bei den verwendeten Modellen ist ein klarer Trend in Richtung datenbasierter Algorithmen zu erkennen, allerdings werden hierfür große Mengen an Trainingsdaten benötigt, um zuverlässige Lösungen zu erreichen.

Basiert die Ein- und Ausgabe der Greifpunkte in den empirischen Modellen auf 2D-Kameradaten (siehe Abb. **2.8**) wird zudem die detaillierte Greifpunktbewertung erschwert, da aus den Modellen nur der **TCP** ausgegeben wird und keine genaue Spezifikation der Kontaktfläche. Generell ist der Einsatz kamerabasierter Methoden unter den existierenden Umgebungsbedingungen im **BJ** nur schwer möglich, da die Lage der Bauteile im ungebundenen Pulver die optische Detektion der Bauteile beeinflusst. Gleichzeitig besitzen die Bauteile einen geringen Kontrast zur Umgebung, wodurch die Datengenerierung erschwert wird [Mu et al., **2018**]. Sind die Bauteile nicht detektierbar, stehen keine Eingangsdaten zur Verfügung und somit können die Modelle nicht ausgeführt werden. Zudem besteht bei den datenbasierten Systemen eine starke Abhängigkeit zu der Konfiguration des Handhabungssystems. Bei veränderten Randbedingungen, im Vergleich zu den Einstellungen in den Trainingsdaten, zeigt sich eine deutlich geringere Erfolgsquote [Mahler et al., **2017**].

Im Gegensatz dazu liegt der Fokus bei den analytischen Ansätzen auf der Generierung eines Kräftegleichgewichts, wodurch der Einsatz bei menschenähnlichen Händen mit einer Vielzahl an Kontaktstellen ermöglicht wird. Auch diese Methoden sind bei der Ausgabe der Kontaktfläche eingeschränkt, da die einzelnen Kontaktflächen häufig als Punktkontakte [Liu et al., **2015**] [Lin et al., **2016**] [Borst et al., **2004**] abgebildet werden, oder die ursprüngliche Bauteilgeometrie durch einfache Formen nachbilden [Miller et al., **2003**].

Nachteil der analytischen Methoden gegenüber den empirischen Methoden ist die entstehende Laufzeit, die häufig einen Einsatz in Produktionsumgebungen mit einem variablen Bauteilspektrum ausschließt [Kleeberger et al., 2021a]. Aufgrund der Produktionszeit resultieren im [B.J] jedoch keine Echtzeitanforderungen, weshalb Modelle mit längeren Laufzeiten einsetzbar sind.

Die Greifpunktbestimmung muss nicht nur für ein breites Bauteilspektrum ausgelegt sein, sondern auch detaillierte Informationen über die geometrische Kontaktfläche besitzen, damit eine anschließende mechanische Greifpunktbewertung durchführbar ist. Die möglichen Greifpunkte am Handhabungsobjekt und deren Kontaktstellen bilden zusammen mit dem [CAD]-Modell des Bauteils die Datenbasis aller weiteren Modelle. Da erst nach der Platzierung im Präprozessor die Positionierung der Objekte bekannt ist und geometrische Randbedingungen für die Greifpunktbestimmungen gesetzt werden können, zielt die Greifpunktbestimmung darauf ab, einen möglichst großen Lösungsraum mit einer globalen Verteilung zu identifizieren. Die kontextunabhängige Greifpunktbestimmung liefert einen umfänglichen Lösungsraum und kann für das gleiche Objekt stets wieder verwendet werden.

2.4.2. Greifpunktbewertung

Aufgrund der geringen Festigkeit der Grünlinge nach dem Druck können diese bei der Handhabung leicht beschädigt werden. Um dies zu verhindern, ist eine detaillierte mechanische Bewertung der resultierenden Greifpunkte notwendig. Systeme zur Berechnung des Spannungstensors $\sigma_{i,j}(x, y, z)$ beschränken sich entweder auf die Spannungen an der Objektoberfläche [Pan et al., 2020], basieren auf einer groben Abschätzung [Schmalz, 2018] oder sind an hardwarespezifische Software gebunden [Dharbaneshwer et al., 2021]. Numerisch gestützte Methoden [Pan et al., 2020] [Dharbaneshwer et al., 2021] verwenden zudem keine fertigungsspezifischen [CAD]-Modelle der Bauteile. Merkmal additiv gefertigter Bauteile ist jedoch eine individuell gestaltbare Füllstruktur (engl. Infill) [IVORRA MARTINEZ et al., 2020] im Inneren der Bauteile, die Schalengeometrien und Leichtbaustrukturen ermöglicht. Zwar gleicht die Silhouette des gedruckten Objektes der konstruierten [CAD]-Datei, jedoch unterscheidet sich das Bauteilinnere zwischen beiden Geometrien. Wird eine detaillierte Spannungsanalyse durchgeführt ist daher ein fertigungsspezifisches [CAD]-Modell für das [B.J] notwendig, da die Eingangsdatei ansonsten einem Vollmaterial entspricht. Gleichmaßen wird, zur Bestimmung der resultierenden Spannungen $\sigma_{i,j}$ die Elastizitätsmatrix E des Werkstoffes benötigt.

Durchgeführte Materialprüfverfahren [Oh et al., 2019] [Mariani et al., 2020] zeigen ein anisotropes Materialverhalten für dessen Modellierung nicht alle notwendigen Materialparameter aus den Versuchsergebnissen zur Verfügung stehen.

2.4.3. Kontextbasierte Selektion der Greifpunkte

Im Präprozessor der Slicing Software werden die Bauteile beim **BJ** vor dem Druck, im Arbeitsraum der Anlage, individuell platziert. Die Positionierung und Orientierung der Bauteile ist von der Geometrie des Objekts [Pereira et al., 2018] und den weiteren zu druckenden Teilen [Yau et al., 2022] [Calabrese et al., 2022] abhängig. Im Gegensatz zu anderen **AM**-Verfahren, deren Anlagensteuerung auf dem *G-Code* basiert, erfolgt die Ausgabe im **BJ** in Bitmaps. Aufgrund des abweichenden Datenformats und der prozesstechnischen Unterschiede sind Lösungen für **MEX**-Anlagen [Becker et al., 2019] [Wiedholz et al., 2021] nicht auf das **BJ** übertragbar. Eine Rekonstruktion der Daten muss im **BJ** auf den diskreten Daten aus den Bitmaps erfolgen und sowohl eine Bauteilzuweisung, als auch eine räumliche Positionierung enthalten.

Des Weiteren nutzen bisherige Systeme entweder eine vereinfachte Strategie zur Greifpunktbestimmung [Becker et al., 2019] oder sind nicht in der Lage, eine Entnahmereihenfolge bei dicht gepackten Bauräumen zu generieren [Wiedholz et al., 2021]. Besonderheit bei **AM**-Verfahren und insbesondere beim **BJ** ist der Druck mehrerer Bauteile, deren Verteilung im Bauraum durch das Nesting erfolgt, in einem Auftrag. Durch die geometrische Verteilung der Objekte im Bauraum wird die Erreichbarkeit der identifizierten Greifpunkte eingeschränkt und muss vor der Entnahme überprüft werden.

3. Computergestützte Greifpunktbestimmung

Unter Berücksichtigung der Bauteilgeometrien in [AM](#)-Verfahren und den Kontaktformen (siehe [Abb. 1.4 S. 11](#)) entstehen zwei Hauptkategorien, die in separaten analytischen Modulen (siehe [Abb. 3.1](#)) berechenbar sind.



Abbildung 3.1.: Schematischer Ablauf der Greifpunktbestimmung für das basierend auf den STL-Dateien der Bauteile und des Endeffektors.

Mit den Modulen können kraftschlüssige Greifpunkte (siehe [Kapitel 3.1](#)) sowie formschlüssige Greifpunkte (siehe [Kapitel 3.2](#)) zwischen Endeffektor und Handhabungsobjekt identifiziert werden. Bei gekrümmten Wirkflächen entsteht eine formschlüssige Verbindung (siehe [Kapitel 3.2](#)). Die kraftschlüssigen Verbindungen entsprechen einem Spezialfall der formschlüssigen Verbindungen, werden aufgrund der unterschiedlichen Modelle im Nachfolgenden aber separat betrachtet. Aus beiden Kategorien können zusätzlich hybride Kontaktformen (siehe [Kapitel 3.3](#)) gebildet werden. Eingangsdaten für jedes Modul ist das Handhabungsobjekt und der Endeffektor im STL-Format. Für die einzelnen Berechnungen in den Modulen können Grenzwerte verwendet und individuell angepasst werden. Eine Auflistung der verwendeten Werte ist in [A.1](#) auf [S. 163](#) zu finden. Die aufgelisteten Werte liefern für die gewählten Testobjekte und Testszenarien (siehe [Kapitel 6 S. 97](#)) einen ausreichenden Lösungsraum. Für Objekte

mit anderen Abmessungen und geometrischen Merkmalen müssen diese gegebenenfalls angepasst werden.

3.1. Kraftschlüssige Greifpunkte

Die kraftschlüssigen Greifpunkte werden differenziert, je nachdem, welche Kontaktgeometrie resultiert. Mit planaren Wirkflächen am Endeffektor können ebene Kontaktstellen zwischen Endeffektor und Handhabungsobjekt resultieren (siehe Kapitel 3.1.1). Zusätzlich können bei gekrümmten Bauteiloberflächen punkt- und linienförmige Kontaktstellen (siehe Kapitel 3.1.2) resultieren.

3.1.1. Ebene Kontaktflächen

Besitzen sowohl der Endeffektor als auch das Handhabungsobjekt planare Flächen eignen sich diese Bereiche für eine Überlappung der beiden Wirkflächen und zur Bestimmung von Greifpositionen. Damit diese Stellen berechnet werden können, gilt es in einem ersten Schritt, die Wirkflächen am Endeffektor zu identifizieren (siehe Kapitel 3.1.1.1) und anschließend Flächenpaare (siehe Kapitel 3.1.1.2), bestehend aus parallelen Flächen am Handhabungsobjekt, zu bestimmen. Beide Schritte werden als Datenvorbereitung zusammengefasst (siehe Abb. 3.2) und stellen die Eingangsdaten für die anschließende Greifpunktbestimmung bereit.

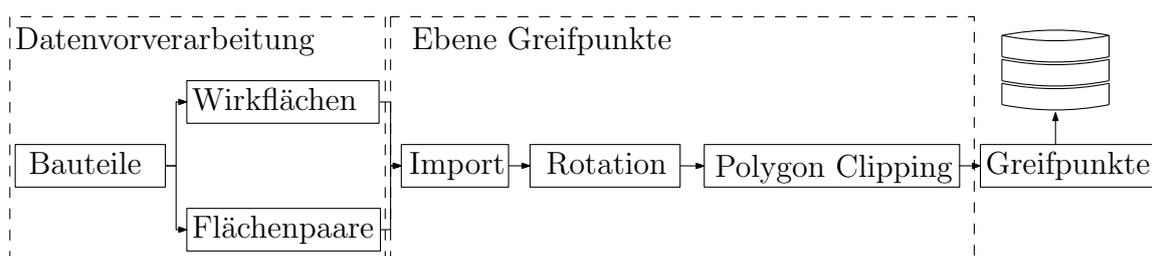


Abbildung 3.2.: Schematischer Ablauf der Greifpunktbestimmung für ebene Kontaktflächen.

Nachdem die relevanten Flächen identifiziert sind, erfolgt die Anordnung und die eigentliche Überprüfung der Flächen durch ein Polygon Clipping Verfahren (siehe Kapitel 3.1.1.3) und somit die Bestimmung der möglichen Greifpunkte. Durch die Verwendung des Clipping Verfahrens lässt sich die überlappende Fläche genau bestimmen, sodass

nicht nur vollständige Kontakte existieren müssen, sondern auch individuelle Grenzwerte gesetzt werden können und partielle Überlappungen ermöglicht werden.

3.1.1.1. Identifikation der Wirkflächen am Endeffektor

Die Ableitung der Wirkflächen wird manuell anhand eines **CAD**-Modells im STL-Format durchgeführt. Hierfür werden auf der triangulierten Oberfläche die relevanten Dreiecke selektiert und in zwei Sets gruppiert (siehe Abb. **3.3**).

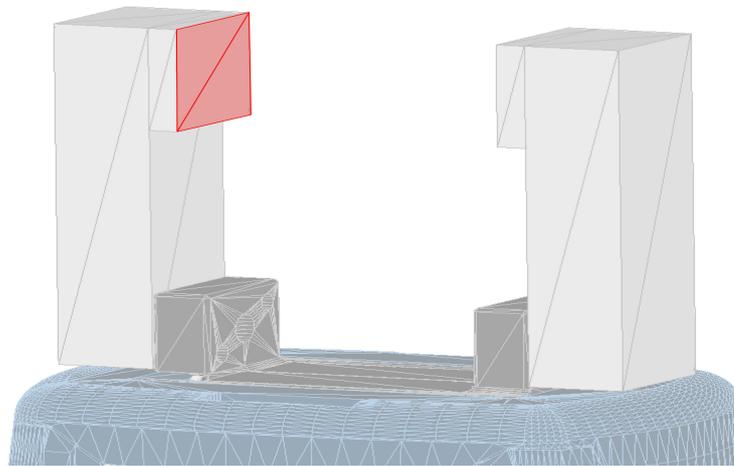


Abbildung 3.3.: Selektion der der Wirkflächen (rot) für die Greifpunktbestimmung am Beispiel eines Co-Act EGP-C-40 der Firma Schunk mit planaren Kontaktstellen.

Die abgeleiteten Kontaktflächen werden als quasi STL-Format abgespeichert. Dies bedeutet, dass die triangulierte Fläche und alle selektierten Dreiecke O durch ihre Eckpunkte V_i ($i = 1, \dots, M$), wobei M der Gesamtanzahl an Eckpunkten entspricht und der dazugehörigen Flächennormale n_i ($i = 1, \dots, O$), erhalten bleiben. Nach [Szilvsi-Nagy et al., 2003] ist die Voraussetzung für das STL-Format ein geschlossener, dichter Volumenkörper wohingegen die Wirkflächen am Endeffektor als 3D-Fläche dargestellt sind. Die abgeleiteten Geometrien besitzen die identische Struktur wie STL-Daten, wodurch dasselbe Modul zum Import und Export verwendet werden kann. Allerdings entspricht die Repräsentation, nach der Definition von [Szilvsi-Nagy et al., 2003], nur einer „quasi STL-Datei“, da die 3D-Fläche kein geschlossener Volumenkörper ist.

3.1.1.2. Bestimmung paralleler Flächen am Handhabungsobjekt

Vor der eigentlichen Berechnung aller Flächen am Handhabungsobjekt erfolgt zunächst der Datenimport aus der STL-Datei. Aus der Datei werden alle Dreiecke in einer $(N \times 9)$ Matrix und Normalenvektoren in einer $(N \times 3)$ Matrix abgespeichert, wobei N der Anzahl an Dreiecken im Oberflächennetz entspricht. Nach dem Einlesen der Daten wird für jedes Dreieck t_i ($i = 1, \dots, N$) eine Ebene E_i in der *Hesseschen Normalform* aufgespannt

$$E_i : \frac{\vec{n}_i}{\|\vec{n}_i\|} \cdot (\vec{x} - \vec{s}_i) \text{ mit } i = 1, \dots, N. \quad (3.1)$$

Für den Stützvektor s_i wird ein Eckpunkt V_i des Dreiecks i ausgewählt und anschließend die Lage aller weiteren Dreiecke überprüft. Ist der Abstand aller Eckpunkte $V_{j,1,2,3}$ eines betrachteten Dreiecks t_j ($j \in 1, \dots, N$) kleiner als der gesetzte Grenzwert d_{grenz} , liegt das Dreieck in der Ebene. Da die *Hesseschen Normalform* verwendet wird, kann der Abstand eines Punktes nach dem Einsetzen direkt abgelesen werden.

Aus dem Set an berechneten Ebenen werden parallele Ebenenpaare gebildet und abgespeichert. Bei dieser Überprüfung werden sowohl der Winkel α zwischen den Normalenvektoren, als auch der Abstand d zwischen den Ebenen evaluiert. Der Winkel α zwischen den Normalenvektoren muss im Bereich $180 \pm \alpha_{grenz}$ liegen und der Abstand im Arbeitsbereich des Greifers $d \in [d_{min}, d_{max}]$ damit eine parallele Klassifizierung resultiert.

3.1.1.3. Polygon Clipping zur Bestimmung von Kontaktflächen

Stehen die abgeleiteten Flächen des Handhabungsobjektes und des Endeffektors zur Verfügung, erfolgt ein Abgleich zwischen den Polygonen. Hierfür wird zunächst die Kontur K beider Flächen bestimmt. Da die Außenkanten der Polygone aus einzigartigen Kanten k im Set aller Dreiecke N bestehen, werden in einem iterativen Vorgehen die drei Verbindungsvektoren $\vec{v}_{i,1,2,3}$ aller Dreiecke bestimmt und somit alle mehrfachen Einträge entfernt (siehe Abb. [3.4](#)). Nach der Identifizierung der Kanten erfolgt die korrekte Anordnung, sodass die Koordinaten der Eckpunkte übereinstimmen und die richtige Kontur des Polygons abgebildet wird. Zur Anordnung wird eine Hashtabelle eingesetzt, in der die beiden Kantenenden $V_{i,1,2}$ ($V_i \in K$) als $\langle \text{Schlüssel, Werte} \rangle$ Paare ($\langle V_{i,1}, V_{i,2} \rangle$ oder $\langle V_{i,2}, V_{i,1} \rangle$) gesetzt werden. Liegt ein Eckpunkt einer Kante bereits als Schlüssel vor, wird dieser als Wert gesetzt und der zweite Eckpunkt als Schlüssel eingetragen. Nachdem alle Kanten in der Hashtabelle eingetragen sind, wird ein zufälliger Startschlüssel selektiert (siehe Abb. [3.4c](#)). Der dazugehörige Wert

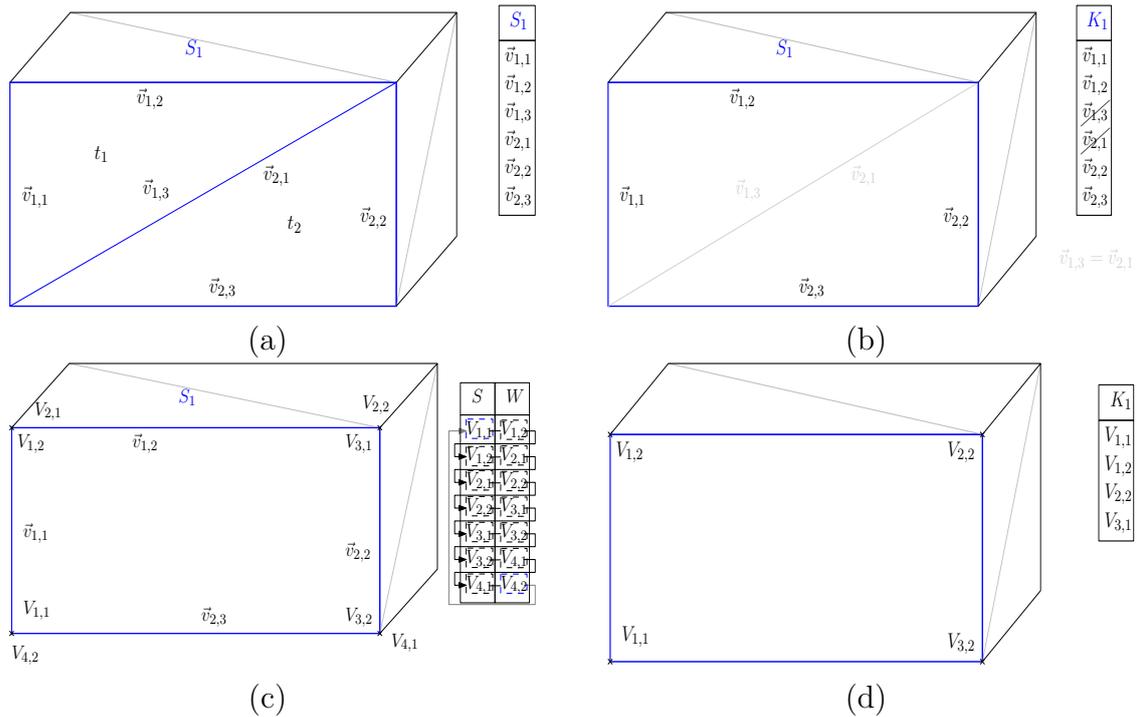


Abbildung 3.4.: Vorgehen zur Ableitung der Kontur K_1 aus dem Polygon S_1 . (a) Identifikation aller Kanten $\vec{v}_{i,1,2,3}$ der enthaltenen Dreiecke t_1, t_2 (b) Speicherung aller einzigartigen Kanten (c) Eintragung der Kantenenden $V_{i,1}, V_{i,2}$ als Schlüssel-Werte Paare in einer Hashmap. Anschließend wird die Hashmap iterativ durchlaufen, bis der Startwert $V_{1,1}$ wieder erreicht wird. Hierdurch werden die Punkte der Kontur in der richtigen Reihenfolge angeordnet. (d) Darstellung der abgeleiteten Kontur bestehend aus $V_{1,1}, V_{1,2}, V_{2,2}, V_{3,2}$.

wird dann wieder als Schlüssel in die Hashtabelle eingegeben, bis der selektiert Startschlüssel als Wert ausgegeben wird. Die in der Iteration durchlaufenen Punkte bilden ein Polygon und können aus der Hashtabelle entfernt werden. Dieser Ablauf wird so lange durchgeführt bis keine Einträge mehr vorhanden sind und somit alle Kanten Polygonen zugewiesen sind.

Als Vorbereitung für die eigentliche Greifpunktbestimmung werden die Polygone zunächst in eine einheitliche Ebene (xy) rotiert (siehe Abb. 3.5). Nach der Bestimmung paralleler Flächen besitzen die Einträge noch ihre globale Orientierung und somit liegt jedes Flächenpaar in einer individuellen Ebene. Durch die Rotation aller Polygone in die xy -Ebene mit der Rotationsmatrix R_{xy} (Euler-Winkel) kann ein einheitliches Vorgehen angewendet werden.

Sind die Polygone in die xy -Ebene rotiert, werden die minimalen und maximalen x und y -Werte beider Polygone bestimmt, damit der Lösungsraum für die Greifpunkt-

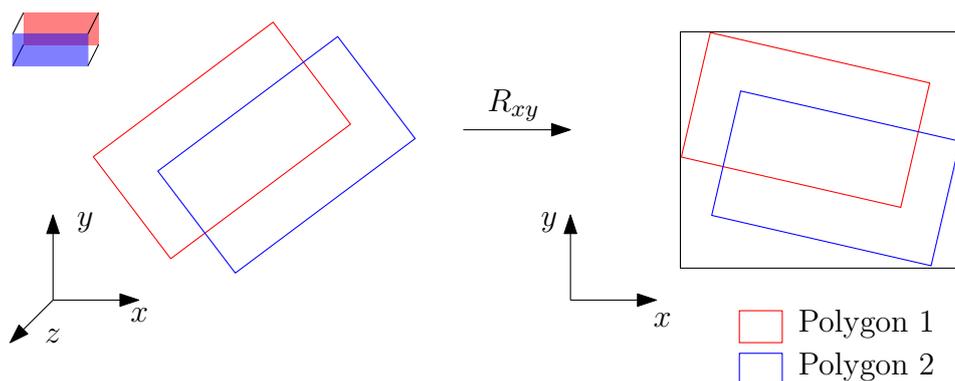


Abbildung 3.5.: Rotation der Polygone paralleler Flächen in die xy -Ebene mit der Rotationsmatrix R_{xy} .

bestimmung eingeschränkt werden kann. An diesen Stellen werden die vertikalen und horizontalen Grenzen gesetzt, sodass ein Lösungsraum in Form eines Rechtecks resultiert (siehe Abb. 3.6).

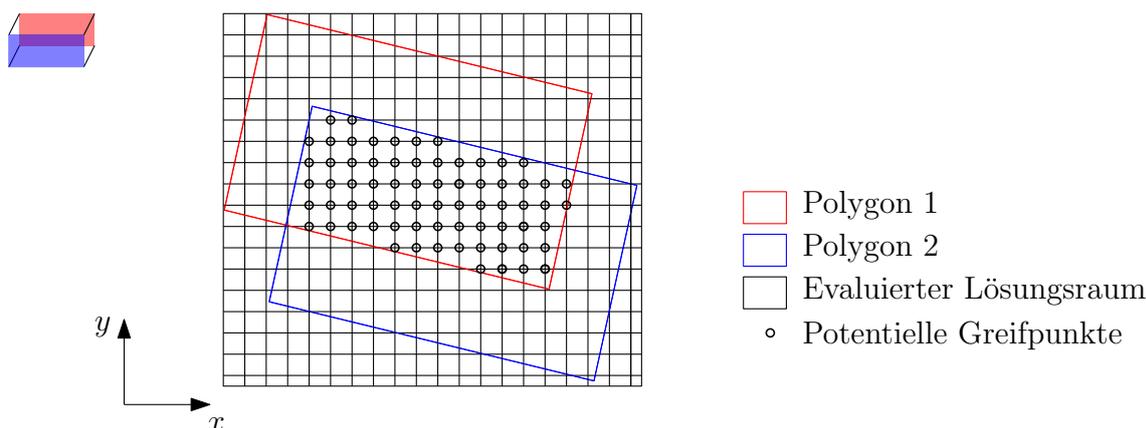


Abbildung 3.6.: Diskretisierung des Lösungsraums mit einem kartesischen Netz für die ebene Greifpunktbestimmung und die Festlegung der potentiellen Greifpunkte ($\text{Polygon 1} \cap \text{Polygon 2}$).

Mit einer individuell anpassbaren Diskretisierung ($\Delta x, \Delta y$) wird ein Raster innerhalb des begrenzenden Rechtecks erzeugt. Die entstehenden Knotenpunkte des Netzes dienen im nächsten Schritt als Evaluationspunkte. Aus Abbildung 3.6 ist ersichtlich, dass nicht alle Rasterpunkte überprüft werden müssen, da diese außerhalb der Polygone liegen. Es bietet sich an, noch eine Einschränkung einzuführen, sodass nur Knotenpunkte betrachtet werden, die in der Schnittmenge beider Polygone liegen. Die resultierenden Knotenpunkte sind als potentielle Greifpunkte in Abbildung 3.6 dargestellt.

Auf Basis der identifizierten Rasterpunkte erfolgt nun der eigentliche Polygonabgleich

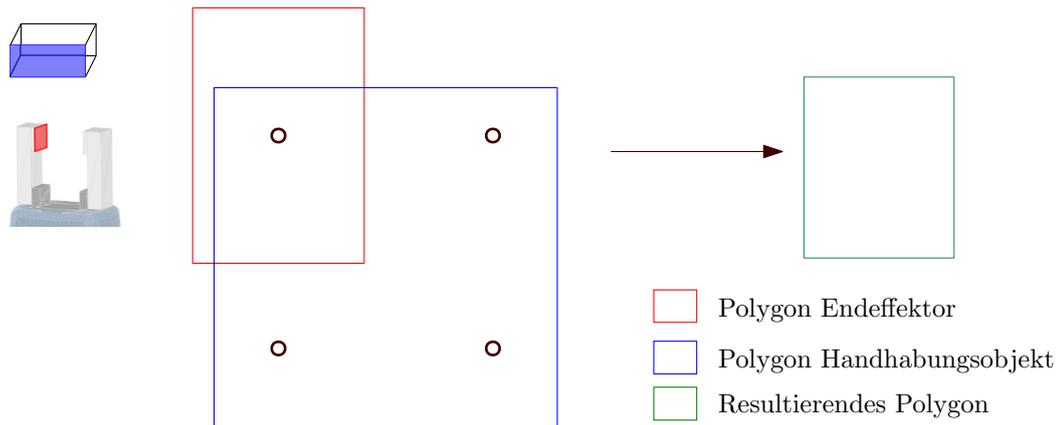


Abbildung 3.7.: Bestimmung der gemeinsamen Fläche zwischen dem Endeffektor (rot) und dem Bauteil (blau) mittels Polygon Clipping. Die Kontaktfläche des Endeffektors wird an definierten Rasterpunkten positioniert und über die Bauteilfläche gelegt. Durch das Polygon Clipping entsteht das resultierende Polygon und repräsentiert die Schnittmenge beider Flächen.

zwischen den Flächen auf dem Handhabungsobjekt und der Greiferfläche. Dafür werden die Wirkflächen mit ihrem Schwerpunkt an den Rasterpunkten positioniert und die Überlappung der beiden Flächen mittels Polygon Clipping bestimmt (siehe Abb. 3.7). Als Clipping Algorithmus können der *Weiler-Atherton* Algorithmus [Weiler et al., 1977] und der *Vatti clipping* Algorithmus [Vatti, 1992] eingesetzt werden. Der Algorithmus von *Sutherland und Hodgman* [Sutherland et al., 1974a] ist im Gegensatz zu den anderen beiden Algorithmen nicht in der Lage, zwei konkave Polygone gegeneinander zu schneiden und kann deshalb nicht eingesetzt werden. Durchgeführte Tests (siehe Kapitel A.2) zeigen hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Stabilität des *Weiler-Atherton* und *Vatti* Algorithmus keinen Unterschied, jedoch eine bessere Laufzeit bei der Verwendung des *Vatti* Algorithmus. Damit der evaluierte Punkt als Greifpunkt abgespeichert wird, muss sowohl in Polygon 1, als auch in Polygon 2 das resultierende Clipping Polygon größer oder gleich einem gesetzten Grenzwert A_{grenz} sein. Die Einstellung eines Grenzwertes ermöglicht die Bestimmung von Teilüberlappungen, dies bedeutet, dass nicht die gesamte Wirkfläche des Greifers mit dem Handhabungsobjekt in Kontakt stehen muss. An einem Rasterpunkt erfolgen mehrere Überprüfungen, da durch die Rotation der Greiferfläche um den Rasterpunkt mehrere unterschiedliche Griffe resultieren können. Durch eine infinitesimale Rotation des Polygons liegt theoretisch ein unendlicher Lösungsraum vor, der durch das Rotationsinkrement $\frac{360^\circ}{n}$ eingeschränkt wird. Wobei n der Anzahl an rotatorischen Diskretisierungen entspricht. Für die Speicherung der Greifpunkte erfolgt

eine Rücktransformation mit R_{xy}^{-1} in die globalen Koordinaten.

3.1.2. Punkt- und Linienförmige Kontaktpositionen

Additiv gefertigte Bauteile weisen häufig topologieoptimierte Strukturen, Krümmung und unregelmäßige Formen auf. Ein formschlüssiger Kontakt ist bei diesen Bauteilen oft nur mit speziell entwickelten Endeffektoren möglich, die mittels Boolescher Operatoren anhand der **CAD**-Dateien abgeleitet werden. Der Einsatz dieser Konfiguration ist zwar nicht unbedingt auf das spezifizierte Bauteil beschränkt, jedoch ergibt sich für abweichende Geometrien nur eine kraftschlüssige Verbindung. Durch die unregelmäßigen Strukturen ergeben sich deshalb 1D-Punktkontakte oder 2D-Linienkontakte. Zur Identifizierung dieser Stellen wird ein zweistufiges Verfahren eingesetzt (siehe Abb. **3.8**).

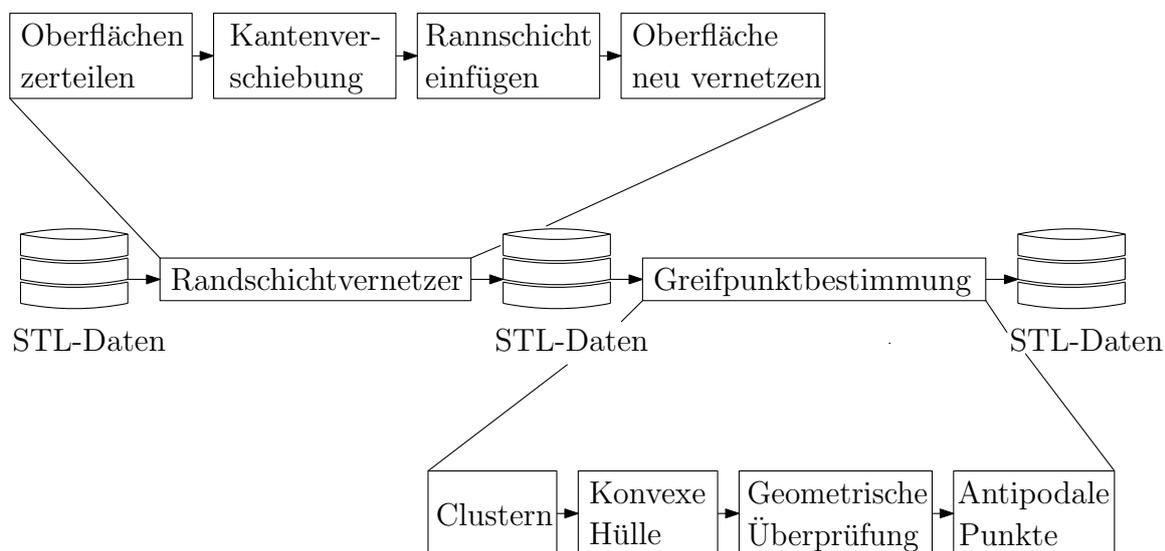


Abbildung 3.8.: Programmablauf für die Bestimmung von Punkt- und Linienkontakten am Handhabungsobjekt basierend auf STL-Daten. Der Ablauf ist in zwei Teilschritte unterteilt: 1. Randschichtvernetzung 2. Greifpunktbestimmung.

Ausgehend von der STL-Datei kann die triangulierte Oberfläche des Bauteils neu vernetzt werden, sodass eine Randschicht (siehe Kapitel **3.1.2.1**) erzeugt wird. Dieser Schritt ist optional und nicht unbedingt für jedes Bauteil notwendig. Wird die Vernetzung nicht ausgeführt, wird allerdings bei Extrusionen, Vertiefungen, Löchern und Kerben in der Bauteilgeometrie nicht der gesamte Lösungsraum erfasst.

Anschließend erfolgt die Greifpunktebestimmung durch lokal aufgespannte konvexe Hüllen (siehe Kapitel **3.1.2.2**). Aus diesen werden dann antipodale Paare gebildet um

Punkt- und Linienkontakte zu identifizieren (siehe Kapitel [3.1.2.3](#)).

3.1.2.1. Neuvernetzung der STL-Dateien zur Generierung von Randschichten

Zentraler Bestandteil des Vorgehens ist die tesselierte Repräsentation der Oberfläche eines Bauteils. Für den weiteren Sprachgebrauch in diesem Abschnitt wird die triangulierte Oberfläche des Bauteils und deren geometrische Beschreibung im Folgenden näher definiert [Jiang, [2020](#)]:

- **Fläche:** Angrenzende Elemente eines Netzes, die einen gemeinsamen Normalenvektor \vec{n} besitzen bilden eine Fläche.
- **Oberfläche:** Der Zusammenschluss mehrerer aneinander angrenzender Flächen, deren Normalenvektoren \vec{n} sich um den Winkel $\pm\gamma$ unterscheiden, werden zu einer Oberfläche gruppiert.

In Strömungssimulationen besteht bereits die Möglichkeit Randschichten im Netz zu erstellen, sodass die fluiddynamische Grenzschicht in den Randbereichen abbildbar ist [Ovcharenko et al., [2013](#)]. Die erzeugte Randschicht bei diesem Vorgehen beinhaltet jedoch tetragonale Elemente und eignet sich deshalb nicht für das STL-Format. Zur Bildung kleinerer Elemente kann ebenfalls eine höhere Diskretisierung angewendet werden, bei der eine maximale Dreiecksfläche definiert wird [Kleeberger et al., [2021b](#)]. Allerdings führt diese Tesselierungs-Einstellung zu einer signifikanten Erhöhung der Dreiecke und somit zu einer erhöhten Rechenzeit, da die gesamte Domäne kleiner diskretisiert wird. Angestrebt wird allerdings die Anzahl an Elementen so gering wie möglich zu halten und nur lokal die Vernetzungsparameter zu ändern.

Für die Neuvernetzung des Bauteils sind vier Schritte notwendig: Gruppierung von Flächen, Verschiebung der Eckpunkte, Einfügung der Randschicht und die Neuvernetzung der Oberfläche.

Im ersten Schritt werden alle Dreiecke t_n ($n = 1, \dots, z$), wobei z der Anzahl an Oberflächendreiecken in der STL-Datei entspricht, in Flächen A_i ($i = 1, \dots, n$) und anschließend Oberflächen S_j ($j = 1, \dots, m$) gruppiert (siehe Abb. [3.9](#)). n, m entsprechen der Anzahl an Flächen und Oberflächen in der STL-Datei. Die Zuteilung erfolgt anhand des Winkels $\gamma_{i,j}$ zwischen beiden Normalenvektoren

$$\gamma_{i,j} = \arccos \frac{n_i \cdot n_j}{|n_i| \cdot |n_j|}. \quad (3.2)$$

Liegt der Winkel im zulässigen Bereich $\pm\gamma_{grenz}$ wird A_i zur Oberfläche S_j gruppiert. Zu jeder Oberfläche wird der Rand K_j ($j = 1, \dots, m$) bestimmt. Als Rand wird die Verbindung aller Eckpunkte mit einer Hashmap und dem gleichen Vorgehen wie in Kapitel [3.1.1.3](#) (siehe Abb. [3.4](#) S. [51](#)) gebildet. Somit resultieren nur Dreiecke t_n , die sich in mehreren Oberflächen befinden:

$$K_j = \{t_n | (t_n \in A_i(S_j) \cap (t_n \in A_i(\notin S_j)))\}. \quad (3.3)$$

Für den Rand K_j wird eine einfache Kopie (engl. shallow copy) erstellt, anhand derer die Eckpunkte $V_{j,l}$ ($l = 1, \dots, x$), der Oberfläche S_j , verschoben werden, wobei x der Anzahl an Randpunkten in K_j entspricht. Das Vorgehen zur Verschiebung der Eckpunkte für die Randschichtvernetzung ist in Abb. [3.10](#) dargestellt.

Die Verschiebung wird sequentiell mit Hilfe der angrenzenden Ebenen durchgeführt. Dabei werden für jeden Eckpunkt alle Flächen betrachtet, in denen sich dieser befindet und zwei Randbedingungen gesetzt:

- **RB 1:** Der Eckpunkt $V_{j,l}$ hat den Abstand d zu den Hilfsebenen $E_{j,l,cmp}$:

$$d(V_{j,l}, P_{j,l,cmp}) = \frac{|a_{j,l,cmp} \cdot x_{j,l} + b_{j,l,cmp} \cdot y_{j,l} + c_{j,l,cmp} \cdot z_{j,l} - d|}{(a_{j,l,cmp}^2 + b_{j,l,cmp}^2 + c_{j,l,cmp}^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.4)$$

wobei $a_{j,l,cmp}$, $b_{j,l,cmp}$ und $c_{j,l,cmp}$ die Hyperparameter der Ebene $E_{j,l,cmp}$ repräsentieren.

- **RB 2:** Die ursprüngliche Geometrie des Netzes soll erhalten bleiben, somit muss der Abstand von $V_{j,l}$ zur eigenen Fläche $E_{j,l}$ null sein $d(V_{j,l}, P_{j,l}) = 0$.

Positionen, die die Randbedingungen erfüllen und einen minimalen Abstand zum ur-

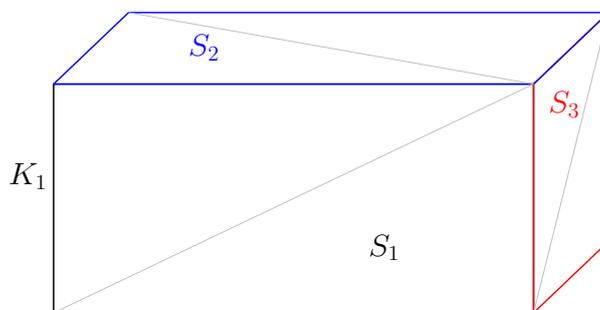


Abbildung 3.9.: Gruppierung der Dreiecke in Oberflächen (S_1, S_2, S_3) und Ableitung der Kontur K_1 für einen Hexaeder.

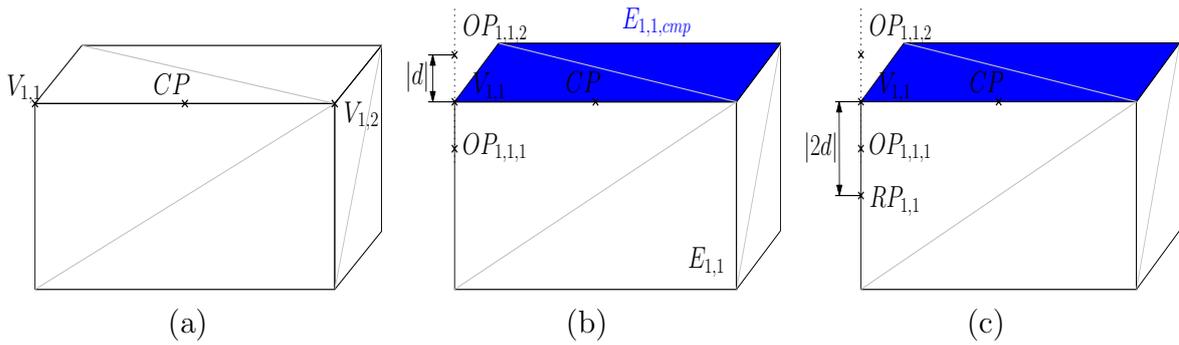


Abbildung 3.10.: Vorgehen zur Verschiebung der Eckpunkte für die Randschichtvernetzung. (a) Identifizierung der Eckpunkte $V_{1,1}, V_{1,2}$ auf dem Rand K_1 der Oberfläche (b) Einfügen von Hilfspunkten $OP_{1,1,1}, OP_{1,1,2}$ mit dem Abstand d zur aufgespannten Hilfsebene $E_{1,1,cmp}$. Gleichzeitig liegen die Hilfspunkte in der Hilfsebene $E_{1,1}$. (c) Einfügen des neuen Randpunktes $RP_{1,1}$ mit dem Abstand $2d$ zum ursprünglichen Eckpunkt $V_{1,1}$ mit Hilfe des Zentrums CP .

sprünglichen Punkt $V_{j,l}$ haben, werden mit einem Sequential Least Squares Programming (SLSQP) Optimierung [Schittkowski, 1987] bestimmt. Resultat des Optimierungsproblems sind zwei Punkte $OP_{j,l,1}$ und $OP_{j,l,2}$. Einer dieser Punkte liegt in der Fläche S_j und der andere außerhalb von S_j . Mit Hilfe des Punktes CP im Kantenzentrum wird zusätzlich eine Klassifizierung durchgeführt. Bei einer Klassifizierung als innenliegende Kante erfolgt die Verschiebung des Hilfspunktes $RP_{j,l}$ in Richtung Bauteilinneren und bei außenliegenden Kanten in die entgegengesetzte Richtung. Der Hilfspunkt hat den Abstand $2d$ zum ursprünglichen Punkt $V_{j,l}$. Wird nun der Abstand der Punkte $OP_{j,l,1,2}$ zu $RP_{j,l}$ bestimmt, entspricht der Punkt mit dem kürzeren Abstand der zutreffenden Verschiebung (siehe Abb. 3.11a). Dieser Vorgang wird für jeden Eckpunkt wiederholt. Bevor die Dreiecke der Randschicht eingefügt werden können, erfolgt eine Sortierung der Elemente. So kann der Randbereich nach einer Verschiebung der Knoten trianguliert werden und eine Überschneidung mit bestehenden Elementen vermieden werden (siehe Abb. 3.11b).

3.1.2.2. Identifizierung konvexer Stellen am Handhabungsobjekt

Die eigentliche Identifizierung der Kontaktstellen erfolgt mittels lokal aufgespannter konvexer Hüllen. Hierfür wird für ein ausgewähltes Dreieck t_n (siehe Abb. 3.12a) ein Cluster T_i aus angrenzenden Dreiecken gebildet (siehe Abb. 3.12b). Als unteren Grenzwert für die Bildung eines Clusters T wird ein Flächenabgleich, der enthaltenen

Dreiecke, mit den Wirkflächen A_{WF_1}, A_{WF_2} des Endeffektors durchgeführt:

$$\sum_{i=0}^N A_{t_n} \geq \text{Max}(A_{WF_{1,2}}), \text{ mit } n \in T. \quad (3.5)$$

Wobei N der Anzahl an Dreiecken im Cluster entspricht. Mit dieser Randbedingung wird sichergestellt, dass die konvexe Stelle mindestens genauso groß ist wie die Wirkflächen des Endeffektors.

Die Klassifizierung der erstellten Cluster T als konvexe Stelle und somit als gültige Kontaktposition basiert auf der Erzeugung einer konvexen Hülle und einer anschließenden Klassifizierung. Die konvexe Hülle $CH_i(T_i)$ des Clusters (siehe Abb. 3.13a) wird mittels einer Delaunay-Triangulation [Cohen-Steiner et al., 2002] gebildet. Der entstehende Hüllkörper repräsentiert ein minimales Volumina, das alle Knotenpunkte p_i des Clusters T_i beinhaltet. Mit der konvexen Hülle CH_i erfolgt die Klassifizierung als konvexe oder konkave Stelle. Für die Unterscheidung wird ein Hilfspunkt AP , der Schwerpunkt des Dreiecks, um einen Abstand d_{shift} mit 3.16 in Richtung des dazugehörigen Normalenvektors \vec{n}_k verschoben (siehe Abb. 3.13b). Durch die Verschiebung liegt AP außerhalb des Netzes, aber nicht zwingend außerhalb des erzeugten Hüllkörpers CH_i . Befindet sich AP außerhalb der konvexen Hülle CH_i oder auf dessen Rand ∂CH_i liegt ein konvexer Bereich, andernfalls ein konkaver Bereich vor und das Cluster wird aus dem Lösungsraum entfernt.

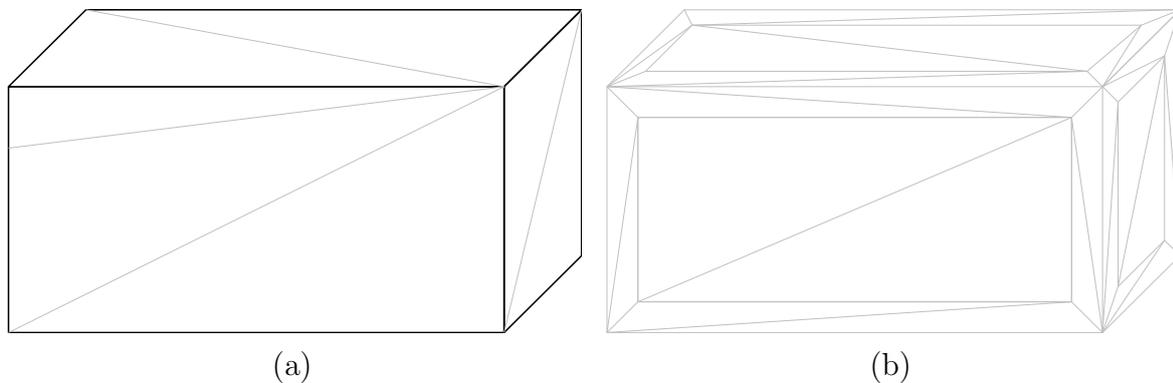


Abbildung 3.11.: Einfügen der Randschicht in die STL-Datei. (a) Triangulation des Bauteils nach der Neuvernetzung eines Eckpunktes $V_{j,l}$ (b) Triangulation des gesamten Bauteils.

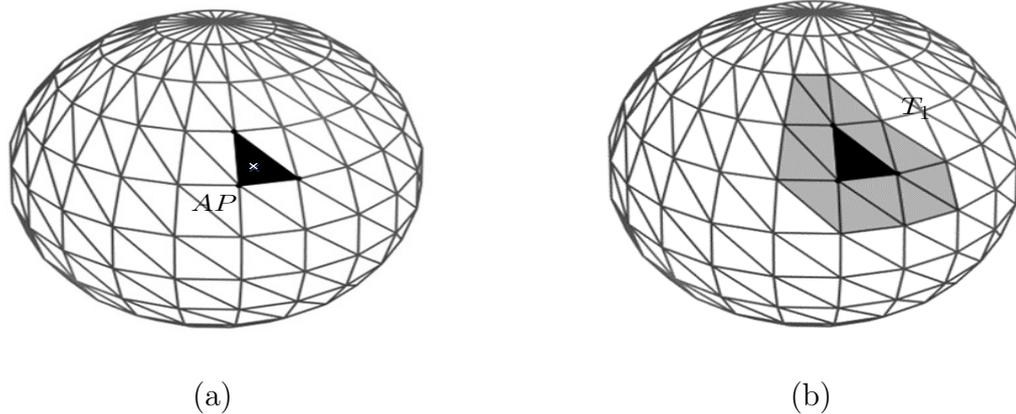


Abbildung 3.12.: Initialisierung der konvexen Stellen auf dem Handhabungsobjekt. (a) Selektion eines Referenzdreiecks t_n (schwarz) und dessen Schwerpunkt AP (b) Bildung des Clusters T_1 aus den angrenzenden Dreiecken (grau).

3.1.2.3. Bestimmung antipodaler konvexer Bereiche

Um einen Greifpunkt darzustellen, müssen zwei konvexe Stellen im Arbeitsbereich des Parallelbackengreifers liegen. Ist eine Stelle bestimmt, muss zu dieser ein antipodaler Bereich identifiziert werden bzw. überprüft werden, ob ein anderes Cluster den Anforderungen entspricht. Damit beide Bereiche im Arbeitsbereich liegen, muss der Abstand im Öffnungsbereich des Endeffektors liegen $d(AP_{v,1}, AP_{v,2}) \in [d_{min}, d_{max}]$ (siehe Abb. 3.14a). Der Winkel zwischen beiden Normalenvektoren muss im definierten Bereich liegen $\beta = 180 \pm \alpha_{grenz}$ und als zusätzliche geometrische Randbedingung wird die Überlappung beider Bereiche evaluiert. Durch die Projektion des Punktes $AP_{v,1}$ in Richtung $-\vec{n}_{k(v,2)}$ wird der Punkt $AP_{v,1,s}$ erzeugt. Ist dessen Abstand kleiner als a , überlappen sich beide Regionen und ein gültiger Greifpunkt resultiert. Räumlich muss sich der Punkt $AP_{v,1,s}$ also innerhalb einer Kugel, die um den Punkt $AP_{v,2}$ aufgespannt wird, mit dem Radius a befinden (siehe Abb. 3.14b). Als TCP resultiert das arithmetische Mittel zwischen $AP_{v,1}$ und $AP_{v,2}$.

3.2. Formschlüssige Kontaktpositionen

Zur Identifikation formschlüssiger Greifpunkte wird die Greifpunktbestimmung als partielle Formanpassung formuliert, sodass nach Übereinstimmungen zwischen der Wirkfläche und der Geometrie des Handhabungsobjektes gesucht wird. Vergleichbar zu [Li et al., 2005] kann ein stochastisches Verfahren eingesetzt werden, um die Handhabungspositio-

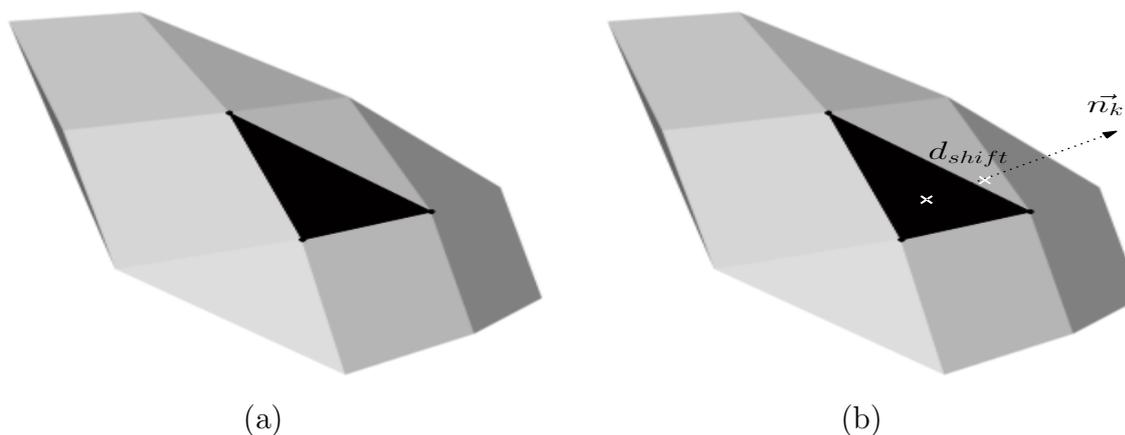


Abbildung 3.13.: Initialisierung der lokalen konvexen Hüllen. (a) Bildung der Konvexen Hülle aus dem Oberflächencluster T (b) Verschiebung von AP in Richtung \vec{n}_k mit der Länge d_{shift} als Hilfspunkt zur Klassifizierung des Oberflächenclusters.

nen zu identifizieren (siehe Abb. 3.15). Beim Einsatz eines Parallelbackengreifers sind zwei Wirkflächen vorhanden, jedoch existiert, durch die translatorische Bewegung der angebrachten Endstücke am Endeffektor, ein Freiheitsgrad. Dieser wird zunächst durch das Erzeugen von zufälligen Punktclustern auf den Wirkflächen identifiziert (siehe Kapitel 3.2.1). Anschließend können sowohl für den Endeffektor als auch für das Bauteil Featuresets gebildet und verglichen werden (siehe Kapitel 3.2.2). Nach diesem Abgleich erfolgt die Bestimmung der affinen Transformation für den Endeffektor (siehe Kapitel 3.2.3) und die Erweiterung des Verfahrens des partiellen Formabgleichs mit Hilfe einer translatorischen Verschiebung (siehe Kapitel 3.2.4).

3.2.1. Bestimmung der Verschiebungsrichtung \vec{s} durch zufällig initialisierte Punktcluster

Notwendig, u.a. für den partiellen Formabgleich und die Belastungsanalyse (siehe Kapitel 4.4 S. 77) ist die Bewegungsrichtung \vec{s} der Greiferbacken (siehe Abb. 3.16). Die Berechnung von \vec{s} erfolgt anhand der abgeleiteten Wirkflächen des Greifers. Durch eine zufällige Generierung von Punkten auf beiden Wirkflächen $P_{1,k}, P_{2,k}$ ($k = 1, 2, \dots, z$), mit z gleich der Anzahl an Punkten, kann durch die Bildung von Verbindungsvektoren $\vec{d}_{k,k}$, \vec{s} angenähert werden. Für die Annäherung werden von jedem Eintrag in N_1 zu allen Einträgen in N_2 , die Verbindungsvektoren gebildet und aufsummiert. Wird dies für alle Einträge in N_1 wiederholt und der Durchschnitt gebildet, ergibt sich eine Annäherung

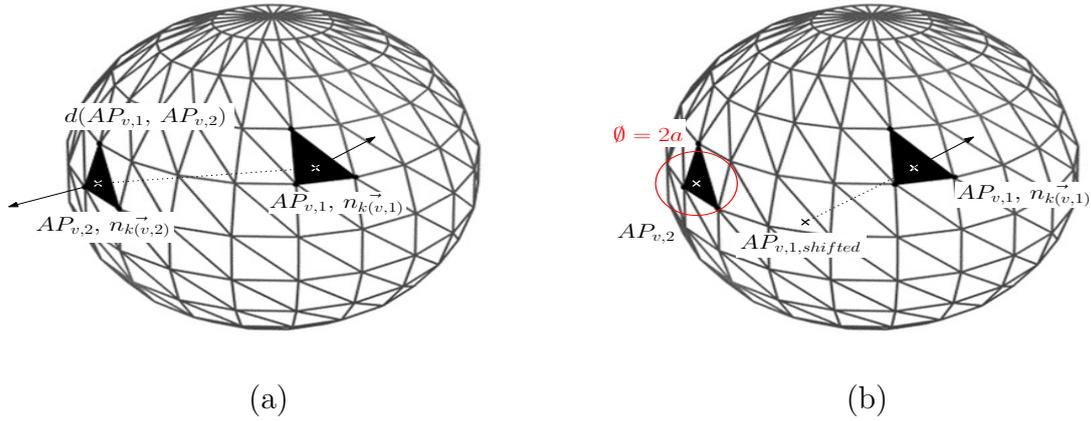


Abbildung 3.14.: Bestimmung antipodaler konvexer Stellen. (a) Berechnung des Abstands zweier Cluster $d(AP_{v,1}, AP_{v,2})$ anhand der Initialisierung zweier Dreiecksscherpunkte (b) Überprüfung der geometrischen Überlappung beider Bereiche durch die Verschiebung von $AP_{v,1}$ in Richtung $-\vec{n}_{k(v,2)}$.

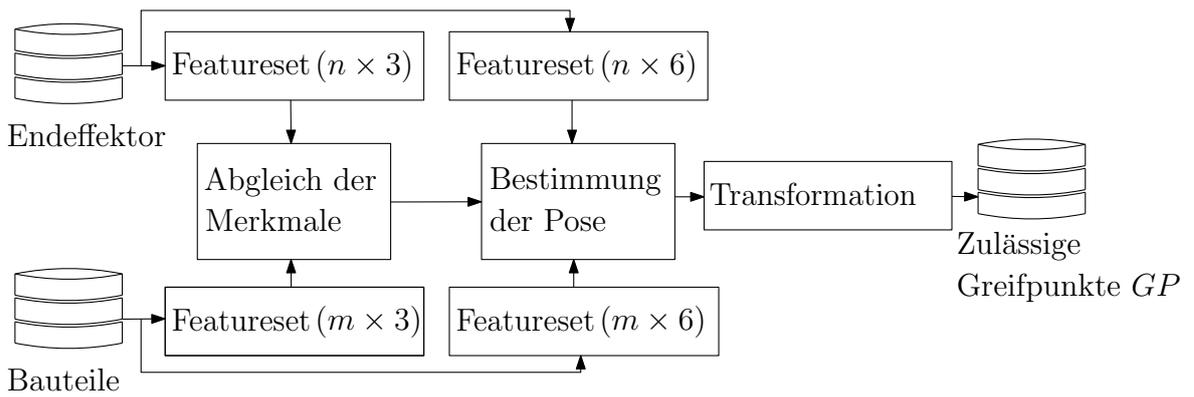


Abbildung 3.15.: Ablauf der formschlüssigen Greifpunktbestimmung anhand von generierten Featuresets für den Greifer und die Bauteile.

der Bewegungsrichtung

$$\vec{s} = \frac{\sum_{l=1}^z \frac{\sum_{k=1}^z \frac{P_{2,k} - P_{1,l}}{\|P_{2,k} - P_{1,l}\|}}{z}}{z}. \quad (3.6)$$

Aufgrund der Punktverteilung entstehen unterschiedliche Längen für die Verbindungsvektoren $\vec{d}_{k,k}$, weshalb eine Normierung durchgeführt wird. So besitzt jeder Vektor $\vec{d}_{k,k}$ die gleiche Gewichtung und beeinflusst \vec{s} gleichermaßen.

Der resultierende Fehler zur tatsächlichen Bewegungsrichtung ist abhängig von der Dichte der generierten Punkte. Generell gilt, je größer und komplexer die Wirkflächen sind, desto mehr Oberflächenpunkte werden benötigt, um eine gute Approximation zu erreichen. Aus der durchgeführten Evaluation mit dem Parallelbackengreifer (siehe

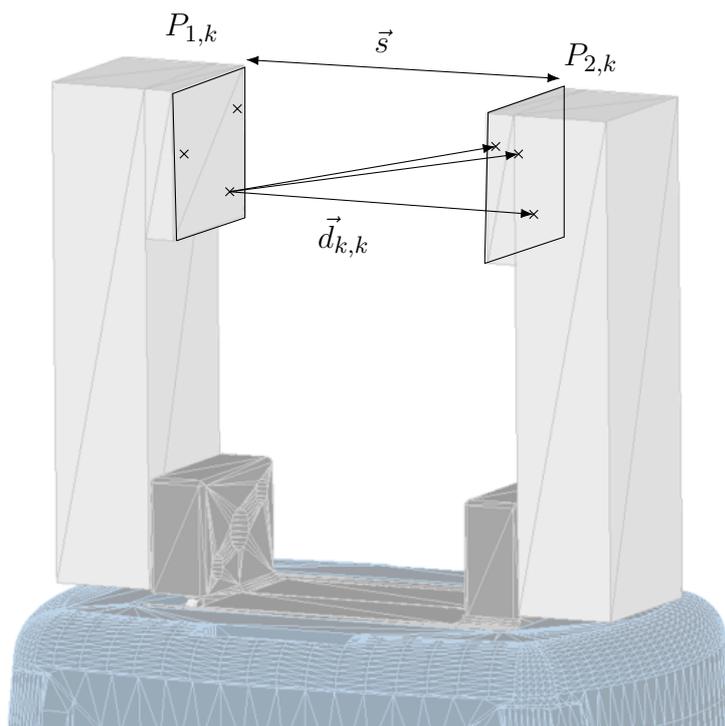


Abbildung 3.16.: Bestimmung der Bewegungsrichtung \vec{s} für Parallelbackengreifer, mit Hilfe zufällig generierter Oberflächenpunkte $P_{1,k}, P_{2,k}$ und den dazugehörigen Verbindungsvektoren $\vec{d}_{k,k}$.

Kapitel [6](#) S. [97](#)) ergibt sich eine Verteilung von 0.2 Punkte/mm^2 als ausreichende Größe. Bei diesem Wert liegt eine Abweichung von $< 1\%$ zur tatsächlichen Richtung vor und kann somit als Näherungswert verwendet werden.

3.2.2. Erstellung und Abgleich der Featuresets

Die Bestimmung formschlüssiger Kontaktpunkte besteht aus einem dreistufigen Prozess, wobei zunächst sichergestellt wird, dass ein Lösungsraum zwischen Endeffektor und Handhabungsobjekt existiert und anschließend eine Überprüfung der exakten Position stattfindet. Für die Existenz und Bestimmung der Position werden Punktpaare (siehe Abb. [3.17a](#)) als geometrische Hilfsobjekte verwendet. Anhand des Verbindungsvektors und der entstehenden Winkel findet anschließend ein Abgleich statt. Hierfür werden zunächst auf einer Wirkfläche des Greifers Punktpaare aus zwei zufällig ausgewählten Oberflächenpunkten ($P_{1,2}$) gebildet. Alternativ zu den Punktpaaren, eignen sich auch Dreiecke, Vierecke oder Polygone für eine geometrische Beschreibung [Osada et al., [2002](#)] des Objektes. Als Set an Merkmalen für den Endeffektor resultiert eine $(n \times 3)$ Matrix, wobei n der Anzahl an Punktpaaren entspricht. Zugehörige Merkmale eines

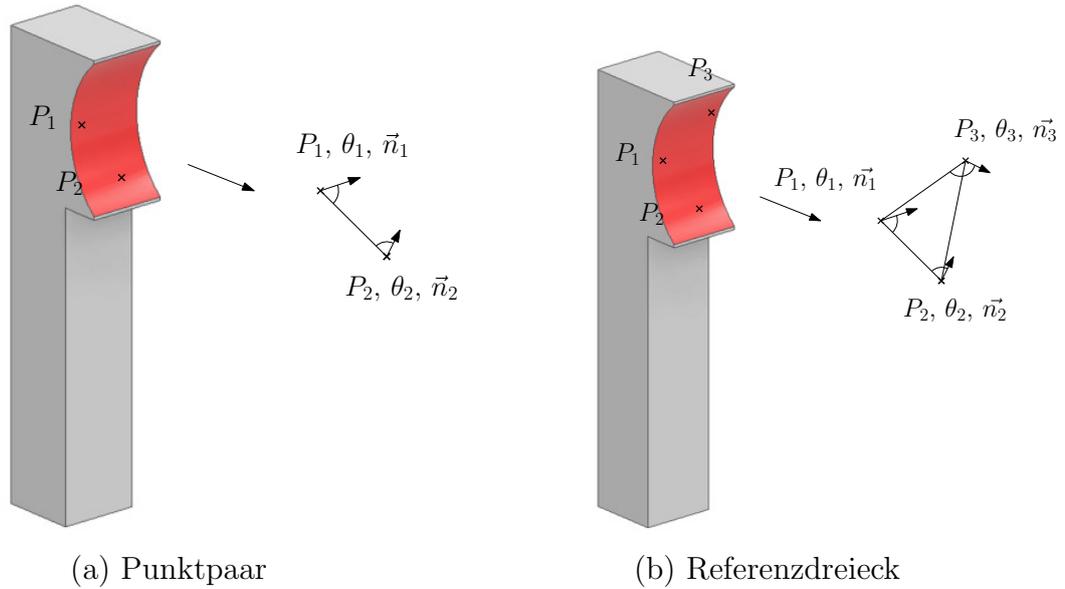


Abbildung 3.17.: Geometrische Beschreibung der Hilfsobjekte für zur Generierung der Merkmale für den formschlüssigen Geometrieabgleich. (a) Punktpaare mit Verbindungsvektor (b) Referenzdreieck.

Punktpaars sind die L_2 -Norm des Verbindungsvektors $P_1\vec{P}_2$ und die beiden Winkel θ_1, θ_2 . θ_1, θ_2 beschreiben die Winkel in rad zwischen dem Verbindungsvektor $P_1\vec{P}_2$ und den zu $P_{1,2}$ zugehörigen Flächennormalen $\vec{n}_{1,2}$. Mit der gleichen Vorgehensweise wird ein Set an Merkmalen ($m \times 3$) für das Handhabungsobjekt erstellt. Im Vergleich zum Endeffektor sollte die Anzahl der Einträge deutlich größer sein ($m \gg n$), damit alle geometrischen Merkmale des Objekts abgebildet sind. Zur Existenz eines Lösungsraums müssen alle Einträge (Zeilen) aus der ($n \times 3$)-Matrix in der ($m \times 3$)-Matrix enthalten sein und in einem Toleranzbereich $\pm d_{grenz}, \pm \theta_{grenz}$ liegen. Während der Abstand d in beiden Datensätzen direkt vergleichbar ist, müssen die Winkel genau entgegengesetzt ausgerichtet sein, da eine formschlüssige Umschließung gefordert wird. Für die Winkel aus beiden Datensätzen (E: Endeffektor, H: Handhabungsobjekt) gilt demnach

$$|\theta_{1,E} + \theta_{1,H} - \pi| \leq \theta_{grenz}, \quad |\theta_{2,E} + \theta_{2,H} - \pi| \leq \theta_{grenz}. \quad (3.7)$$

Sind alle Einträge des Endeffektors in der Matrix des Handhabungsobjektes enthalten erfolgt eine detaillierte Positionsbestimmung und der Formabgleich.

Anstatt eines Sets an Punktpaaren wird hierfür ein Referenzdreieck (siehe Abb. 3.17b), mit Hilfe von drei zufällig generierten Punkten $P_{1,2,3}$, auf der Wirkfläche des Endeffektors gebildet. Aus den Dreiecken werden 6 Werte abgeleitet. Die drei Seitenlängen des

Dreiecks $|d_{1,2,3}|$ und drei Winkel $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Die Winkel resultieren aus der Normale des aufgespannten Dreiecks \vec{n}_{t_i} und den Flächennormalen $\vec{n}_{1,2,3}$ der Eckpunkte. Als Referenzdreieck reicht ein Dreieck aus, jedoch sollte dies nach [Li et al., 2005] möglichst große Seitenlängen besitzen. Zum Abgleich mit dem Handhabungsobjekt werden m -Dreiecke erstellt und deren Werte in einer $(m \times 6)$ -Matrix gespeichert. Der Datensatz wird zeilenweise mit dem selektierten Referenzdreieck abgeglichen. Hierbei werden für die Längen und Winkel äquivalente Rechenoperationen zu den Punktpaaren durchgeführt. Nach einer Normierung der Werte und dem Abgleich mit den Grenzwerten resultieren einseitig überprüfte Kontaktstellen am Handhabungsobjekt.

3.2.3. Bestimmung der affinen Transformation

Bevor eine Evaluation der zweiten Wirkfläche stattfindet, erfolgt eine Neuausrichtung des Endeffektors. Notwendig für die Transformation der CAD-Daten ist eine Rotation R und Translation \vec{t} aller Koordinaten x des Endeffektors. Dies entspricht einer Ausrichtung des Referenzdreiecks $t_E \in \mathbb{R}^3$ mit der identifizierten Position $T_O \in \mathbb{R}^3$:

$$x' = R \cdot x + \vec{t}. \quad (3.8)$$

Für die affine Transformation zwischen zwei Dreiecken $(\langle t_1, t_2, \rangle)$ wird zunächst der jeweilige geometrische Schwerpunkt $SP_{1,2}$ berechnet

$$SP_n = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_i \text{ mit } n = 1, 2. \quad (3.9)$$

Anschließend erfolgt eine Translation beider lokaler Koordinatensysteme, sodass der Koordinatenursprung sich in beiden Datensätzen im geometrischen Schwerpunkt des Dreiecks befindet

$$P'_{E,O_{1,2,3}} = P_{E,O_{1,2,3}} - SP_n \text{ mit } n = 1, 2, \quad (3.10)$$

wobei $P'_{1,2,3}$ die transformierten Eckpunkte repräsentieren. Die Orientierung beider Datensätze wird in der Kovarianzmatrix S dargestellt [Zhang et al., 2021a]

$$S = T_E T_O^T \text{ mit } T_E = P'_{E_{1,2,3}} \text{ und } T_O = P'_{O_{1,2,3}}. \quad (3.11)$$

Liegt die Kovarianzmatrix vor, kann die Rotationsmatrix R zwischen beiden Datensätzen mit der Singulärwertzerlegung (engl. Singular Value Decomposition) (SVD) [Liesen

et al., [2015] bestimmt werden. Für die Anwendung wird angenommen, dass die Eckpunkte beider Dreiecke nach der Rotation identisch sind, also keine Dehnung oder Stauchung vorhanden ist. Dadurch können die singulären Werte \sum der SVD vernachlässigt werden. Die Rotation R zwischen den Datensätzen setzt sich dann aus den beiden Rotationsmatrizen U, V^T zusammen

$$R = VU^T. \quad (3.12)$$

Da R auch eine Spiegelungsmatrix sein kann muss sichergestellt werden, dass R eine Rotation darstellt. Eine Spiegelung tritt auf, wenn für $\det(R) = -1$ gilt [Arun et al., 1987] [Horn, 1954]. In diesem Fall wird die dritte Spalte in V mit -1 multipliziert und für R resultiert

$$R = V \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & \det(VU^T) \end{pmatrix} U^T. \quad (3.13)$$

Ist die Rotation R zwischen beiden Dreiecken $\langle T_E, T_O \rangle$ bekannt, kann zusammen mit den geometrischen Schwerpunkten (SP'_1, SP'_2) die dazugehörige Translation \vec{t} bestimmt werden

$$\vec{t} = SP_2 - R \cdot SP_1. \quad (3.14)$$

3.2.4. Erweiterung des partiellen Formabgleichs für Parallelbackengreifer

Mit der Transformation (R, t) kann eine Wirkfläche des Greifers an dem Handhabungsobjekt positioniert werden. Bevor die Positionierung der zweiten Wirkfläche erfolgt wird die Lage definierter Punkte überprüft. Mit dem Referenzdreieck t_E kann zwar ein partieller Formabgleich durchgeführt werden. Analytisch überprüft ist allerdings nur die Lage der drei Eckpunkte $V_{t_E,1}, V_{t_E,2}, V_{t_E,2}$. Ohne weitere Überprüfung, kann nicht abgesichert werden, dass die gesamte Wirkfläche außerhalb oder auf der Oberfläche des Handhabungsobjektes liegt. Bei 3D-Körpern besteht die Möglichkeit Kollisionen bzw. Intersektionen der Körper durch Ihre Hüllkörper (engl. bounding boxes) zu bestimmen. Da die Wirkfläche allerdings keinen 3D-Volumenkörper darstellt, sondern eine Fläche wird die Lage aller Dreiecksschwerpunkte SP_i überprüft. Liegen diese innerhalb des Handhabungsobjektes tritt eine ungewollte Kollision auf und der Greifpunkt GP wird

aus dem Lösungsraum entfernt:

$$GP = \begin{cases} True, \forall i: SP_i \notin O \\ False, \exists i: SP_i \in O \end{cases} \quad \text{mit } SP_i \in \mathbb{R}^3, i = 1 \dots N, \quad (3.15)$$

wobei O die Menge aller Punkte des Handhabungsobjektes ohne dessen Rand ∂O ist. Zur Überprüfung der Punktlage wird die *Python* Bibliothek *VTK v. 9.0.3* [Schroeder et al., 2006] verwendet. Der Filter *selectEnclosedPoints* klassifiziert die Punkte, je nach ihrer Lage, mit einem Wahrheitswert. Die Klassifizierung basiert auf einer Strahlenverfolgung (engl. Ray tracing) und zählt die entstehenden Intersektionen mit dem Rand ∂O der Domäne [Sutherland et al., 1974b].

Ist die Lage einer Wirkfläche bestimmt, erfolgt die Überprüfung der zweiten Fläche am Endeffektor. Durch den mechanischen Aufbau des Parallelbackengreifers besteht nur ein translatorischer Freiheitsgrad für die antipodale Seite. Diese Richtung entspricht der Verschiebungsrichtung \vec{s} . Im Gegensatz zur ersten Wirkfläche, die mit einem partiellen Formabgleich positioniert wurde, ist dieses Vorgehen für die zweite Seite nicht möglich. Durch die holonome Zwangsbedingung kann für diese Seite nur die Kontaktstelle bestimmt werden und keine optimale Positionierung generiert werden. Zur Berechnung der Kontaktstelle wird eine inkrementelle Verschiebung in Richtung \vec{s} durchgeführt

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \frac{d_{offset}}{\sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}} \cdot -\vec{s}, \quad (3.16)$$

bis ein Punkt SP_i der zweiten Wirkfläche innerhalb des Objektes O liegt. Als Ausgangspunkt wird die maximale Öffnung d_{max} des Greifers verwendet. Liegt dort bereits ein Punkt innerhalb des Objektes wird der Greifpunkt aus dem Lösungsraum entfernt. Die Verschiebung wird bis zur Untergrenze des Arbeitsraums d_{min} ausgeführt. Tritt innerhalb des Intervalls $[d_{min}, d_{max}]$ eine Intersektion auf, resultiert ein gültiger Greifpunkt für das Objekt.

3.3. Hybride Kontaktformen

Je nach Objekt treten nicht nur identische Kontaktstellen und -formen auf, sondern auch Mischformen. Hybride Kontakte können zwischen ebenen Bereichen (siehe Kapitel 3.1.1) und Punkt- oder Linienförmigen Kontaktstellen (siehe Kapitel 3.1.2) auftreten.

Bei formschlüssigen Kontakten (siehe Kapitel [3.2](#)) resultiert durch die inkrementelle Verschiebung keine definierte Kontaktform, sodass hier keine weiteren hybriden Kontaktstellen generiert werden müssen. Die hybriden Positionen setzen sich somit aus den Ebenen E_i und den Oberflächenclustern T zusammen. Der Abgleich erfolgt ähnlich wie bei den antipodalen Bereichen durch eine Überprüfung der Normalenvektoren und des Abstandes zwischen Punkt und Ebene (siehe Kapitel [3.1.2.2](#)).

4. Mechanische Greifpunktbewertung

Die Durchführung der Greifpunktbestimmung in Kapitel 3 als ersten Prozessschritt generiert je nach Objekt, Endeffektor und gesetzten Randbedingungen einen Lösungsraum mit hoher Dimensionalität. Nicht selten sind in diesem mehrere hundert oder tausend Einträge enthalten (siehe Abb. 4.1). Gleichzeitig besteht eine räumliche Verteilung, oft über das ganze Objekt. Für die Auswahl eines Greifpunktes aus der Lösungsmenge wird daher ein Qualitätskriterium benötigt. Die Vielzahl an Greifpunkten und die geometrische Verteilung erfordert einen hohen Aufwand bei einer manuell durchgeführten Analyse, deshalb wird zur Bestimmung ein automatisiertes Verfahren eingesetzt. Nach dem Druckprozess besitzen die Grünlinge eine niedrige Festigkeit, weswegen nur geringe externe Prozesskräfte aufgebracht werden können. Treten zu große Spannungen σ im Objekt auf, können lokale Beschädigungen auftreten und zu Bauteilfehlern führen. Als Qualitätskriterium wird deshalb die mechanische Belastung des Bauteils während des Handhabungsvorgangs Q_S betrachtet. Voraussetzung für die Anwendung der FEM ist eine prozessspezifische Bauteilmodellierung (siehe Kapitel 4.1) auf Basis der Präprozessor

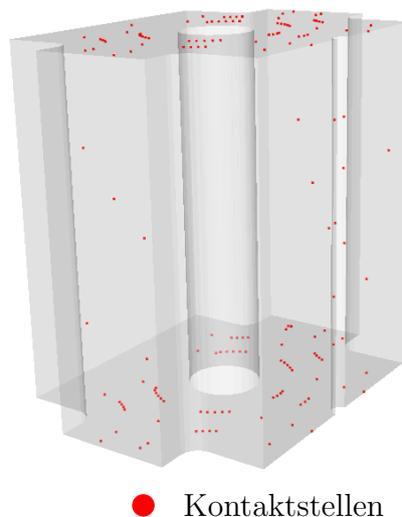


Abbildung 4.1.: Räumliche Verteilung 154 identifizierte Greifpunkte an einem Testobjekt.

Daten. Als Grünlinge weisen die Bauteile ein anisotropes Materialverhalten auf, welches in [4.2](#) modelliert wird. Notwendig hierfür ist eine vorherige räumliche Diskretisierung der Bauteile (siehe Kapitel [4.3](#)). Anschließend wird die mathematische Formulierung (siehe Kapitel [4.4](#)) zur Berechnung der Bewertungsparameter und der dazugehörigen Randbedingungen aufgeführt.

Stehen die Spannungswerte zur Verfügung, kann die Qualitätsmetrik in Kapitel [4.5](#) verwendet werden. Zusätzliche Bewertungsmetriken zur Griffsicherheit [Costanzo et al., [2023](#)] können durch einen gewichteten Mittelwert integriert werden.

Nach [Roa et al., [2015](#)] können als Qualitätsmetrik nicht nur die direkte Interaktion zwischen Endeffektor und Handhabungsobjekt berücksichtigt werden, sondern auch die Erreichbarkeit. Aufgrund der späteren Positionierung und Platzierung im Präprozessor der Objekte erfolgt erst nachgelagert die Trajektorienplanung und die Identifizierung des Anfahrvektors. Mit vorhandenem räumlichen Kontext erfolgt auch die Evaluation der Erreichbarkeit erst in diesem Schritt (siehe Kapitel [5.4.2](#)).

4.1. Prozessspezifisches Bauteilmodell

Als Dateneingang für den Druckprozess dient eine STL-Datei, aus der im Präprozessor einzelne Schichten erstellt werden. Nach dem Produktionsprozess entspricht zwar die geometrische Hülle der Ausgangsdatei, jedoch entsteht im Bauteilinneren eine veränderte Struktur. Je nach eingestellter Füllstruktur (engl. Infill) variieren die Druckzeit, die Festigkeit und die thermischen Eigenschaften des Bauteils. Wird die ursprüngliche [CAD](#)-Datei des Bauteils für die Analyse der mechanischen Belastung verwendet, resultieren verringerte Spannungswerte, da die dortige Modellierung einem dichten Körper (engl. dense body) entspricht. Für die Generierung einer bauteilkonformen Geometrie können die Daten aus dem Präprozessor verwendet werden um die Stellen des Bindemittelauftrags zu identifizieren (siehe Kapitel [4.1.1](#)). Sind die diskreten Punkte bekannt, kann mit einem sequentiellen Algorithmus die Geometrie rekonstruiert werden (siehe Kapitel [4.1.2](#)). Zur Bildung des Volumenkörpers wird eine einfache geometrische Form verwendet, welche die Grenzfläche zwischen Bindemittel und Pulver abbildet (siehe Kapitel [4.1.3](#)).

4.1.1. Bestimmung der räumlichen Diskretisierung anhand der bitmaps

Die erzeugten bitmaps einer STL-Datei enthalten die Punkte des Bindemittelauftrags als Pixel kodiert (siehe Abb. 4.2) und dienen als Grundlage zur Rekonstruktion der Objektgeometrie. Das sequentielle Einlesen aller Schichten n in einer 3D-Matrix ermöglicht die Identifikation dieser Stellen und in Kombination mit der Diskretisierung $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ eine Bestimmung der lokalen Koordinaten. Alle Farbwerte der bitmap werden in **RGB**-Form eingelesen und in $BM \in \mathbb{R}^{b \times h \times n}$ gespeichert. Der Standard **RGB**-Wert in Abbildung 4.2 ist $\langle 0, 0, 0 \rangle$ (schwarz), an diesen Stellen wird kein Bindemittel aufgetragen. An Stellen mit Bindemittelauftrag wird der Farbwert auf $\langle 255, 255, 255 \rangle$ (weiß) durch den Präprozessor gesetzt. Mit einem binären if/else Abgleich können somit aus BM alle Positionen eines Objektes abgeleitet werden. Im Präprozessor kann die Auflösung ($Pixel_x \times Pixel_y$) und die Schichthöhe spezifiziert werden. Die eingestellte Schichthöhe entspricht der Diskretisierung in z -Richtung. Mit den Abmaßen des Bauraums ($b \times h$) kann die Diskretisierung $\Delta x, \Delta y$ berechnet werden

$$\Delta x = \frac{b}{Pixel_x}, \quad \Delta y = \frac{h}{Pixel_y}. \quad (4.1)$$

Ist die Diskretisierung bekannt, können die Stellen des Bindemittelauftrags bestimmt werden. Hierfür wird die Annahme getroffen, dass der Auftrag in der in der Mitte eines Pixels auftritt. Je nach Anlage und Steuerung können Abweichungen entstehen, jedoch

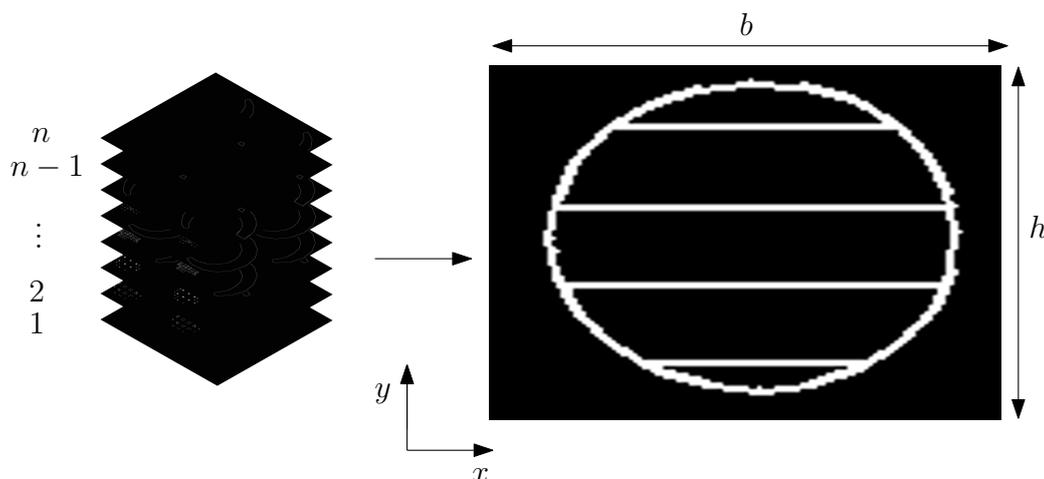


Abbildung 4.2.: Anordnung der bitmaps als Stapel, sowie die **RGB**-codierten Stellen mit $\langle 255, 255, 255 \rangle$ (weiß) und ohne $\langle 0, 0, 0 \rangle$ (schwarz) Bindemittelauftrag.

kann der geometrische Mittelpunkt bei den minimalen Abweichungen als Mittelwert angenommen werden. Als Koordinaten für einen Punkt $P_{i,j,k}$ resultiert

$$P_{i,j,k} = \begin{pmatrix} \Delta x(j-1) + \frac{\Delta x}{2} \\ \Delta y(i-1) + \frac{\Delta y}{2} \\ \Delta z(k-1) \end{pmatrix} \text{ mit } i \in [1, Pixel_y], j \in [1, Pixel_x], k \in [1, n]. \quad (4.2)$$

In z -Richtung beginnt die erste Schicht bei $z = 0$ weswegen das Inkrement um eins verringert werden muss um den tatsächlichen Koordinaten zu entsprechen.

4.1.2. Voxelbasierte Rekonstruktion der STL-Datei

Definiert durch die **RGB**-Werte in den bitmaps wird das Bindemittel an diesen Stellen aufgetragen und bestimmt die Geometrie der Objekte. Werden alle Punkte eingelesen resultiert eine Punktwolke, mit der die STL-Datei des gedruckten Bauteils erstellt werden kann. Klassische Triangulierungsmethoden wie bspw. eine *Delaunay-Triangulation* [Cohen-Steiner et al., 2002] können hierfür jedoch nicht eingesetzt werden, da keine Informationen über die Verbindung der einzelnen Datenpunkte in der Punktwolke enthalten ist. Lediglich die Koordinaten x, y, z sind in den Daten enthalten, aber keine Verbindungsvektoren oder Tuple mit den Knotenpunkten einzelner Elemente. Nach der Anwendung würde zwar eine ähnliche Außengeometrie entstehen, jedoch nicht die komplexe innere Struktur additiv gefertigter Teile resultieren. Werden nur die Datenpunkte betrachtet, können bei der Triangulation geometrische Details wie bspw. Bohrungen, Kerben, Nuten nicht abgebildet werden. Besonders bei einer kleinen Diskretisierung $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ und geringen Abständen zwischen den Koordinaten sind geometrische Veränderungen schwer zu detektieren und liegen unter den Grenzwerten der Algorithmen. Zur korrekten Abbildung der STL-Datei anhand der Punktwolke ist deshalb ein anderes Verfahren notwendig.

Die Ausgabe der Datenpunkte in Schichten und Pixeln erzeugt eine einheitliche Struktur in der Punktwolke. Zudem besitzt jeder Punkt einen direkten Nachbarn in der selben Schicht oder in einer darüber bzw. darunter liegenden. Diese Anordnung und Eigenschaft ermöglicht ein sequentielles Verfahren. Werden an den Einträgen in der Punktwolke geometrische Objekte erzeugt und verbunden, kann die Geometrie des gedruckten Teils nachgebildet werden. Ein ähnliches Vorgehen verwendet der *Marching Cubes* Algorithmus [Newman et al., 2006], jedoch resultiert hiermit eine Isofläche und keine Abbildung der inneren Struktur.

Die Koordinaten aus der Punktwolke dienen dabei als Initialisierungspunkt der geometrischen Objekte (siehe Kapitel 4.1.3). Wird über alle eingelesenen Koordinaten iteriert und für jeden Eintrag n ein Hilfsobjekt $O_i (i = 1, \dots, n)$ erzeugt (siehe Abb. 4.3), stellt die Summe der Objekte eine Abbildung der STL-Datei dar. Nach der Erzeugung der Objekte bilden die Instanzen jedoch noch keine verbundene STL-Datei, sondern nur individuelle Objekte. Anschließend werden deswegen alle erzeugten Voxel mit einer Booleschen Operation $O_i \vee O_j$ vereinigt und somit die STL-Datei rekonstruiert.

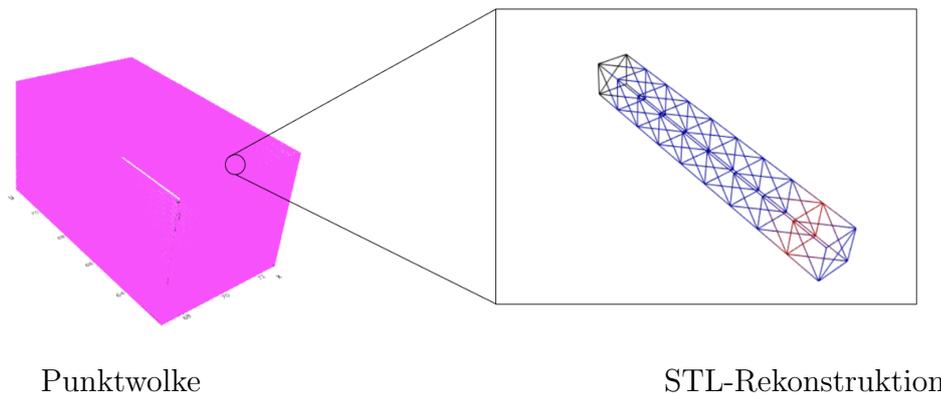


Abbildung 4.3.: Ableitung der STL-Datei mittels Booleschen Operatoren aus den hexagonalen Hilfsgeometrien.

4.1.3. Geometrische Approximation der Grenzfläche

Nach dem Auftrag des Bindemittels diffundiert die Flüssigkeit in das Pulverbett. Durch die entstehende Kapillarströmung verteilt sich das Fluid zwischen den Pulverpartikeln und erzeugt eine charakteristische Grenzfläche zwischen benetztem und trockenem Pulver. Wird zu viel Bindemittel aufgetragen, verteilt sich das Bindemittel außerhalb der gesetzten Grenzbereiche. Bei einem zu geringen Auftrag besitzt der Grünling eine niedrige Festigkeit und kann beschädigt werden [Miyajiri et al., 2018]. Das resultierende Volumina ist u.a. Abhängig vom Bindemittel, den Umgebungsbedingungen, der Viskosität, der Dichte, der Tropfengeometrie, der Korn- und Porengröße sowie der Auftreffgeschwindigkeit. Nach [Mostafaei et al., 2021] entsteht im Mikrobereich eine kugelförmige bzw. elliptische Geometrie für die Grenzfläche.

Eine einfache Modellierung der Durchdringung des Pulvers durch das Bindemittel kann

mittels der *Washburn* Gleichung [Cai et al., 2021]

$$h(t) = \sqrt{\frac{\gamma \cos \theta R t}{2\eta}} \quad (4.3)$$

in Abhängigkeit der Zeit t , des Porenradius R , der Oberflächenspannung γ , der dynamischen Viskosität η und dem Kontaktwinkel θ zwischen Fluid und Festkörper erfolgen. Für eine Anwendung im [B.J](#) schlagen [Barui et al., 2020][Hapgood et al., 2002][Lehmann et al., 2022] eine Erweiterung von R vor, da die Annahme von parallel verlaufenden Kapillarröhren für ein Pulverbett nicht zutrifft. Mit [4.4](#) und einem modifizierten Porenradius R lässt sich zwar die Tiefe der Benetzung berechnen, allerdings in Kombination mit den zur Verfügung stehenden bitmaps keine zweckmäßige geometrische Modellierung durchführen. Die rasterförmige Darstellung in den bitmaps ist um einige Ordnungen größer als der tatsächliche Bindemittelauftrag. Während die bitmaps in konventionellen Formaten ausgegeben werden, verwenden [B.J](#)-Anlagen eine Tropfengröße von $10 - 80 \mu m$ [Barui et al., 2020] und tragen, je nach Einstellung (Vorschub, Taktzahl), das Bindemittel in einem Abstand von $\sim 50.0 \mu m$ auf [Parab et al., 2019]. Abhängig von der Diskretisierung $\Delta x, \Delta y$ werden also mehrere Fluidpartikel in einem Pixel aufgetragen. Wird hierzu die Ausgabe in der Punktwolke und der bereitgestellten Diskretisierung betrachtet ist es weniger sinnvoll, die Geometrie jedes einzelnen Tropfens zu modellieren, sondern eine approximierte Geometrie für jedes Pixel zu initialisieren.

Die vorgegebene rasterförmige Anordnung unterstützt die Modellierung mit einer Voxel Geometrie. Zudem stellt dieser Grundkörper eine gute Näherung der Soll Geometrie des gedruckten Bauteils dar, da die Pixel auch als Eingangsdaten für die Maschinensteuerung dienen.

Für die Instanzierung des Grundkörpers (siehe Abb. [4.4](#)) wird ein Hexagon mit den Kantenlängen $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ verwendet. Diese Kantenlängen entsprechen genau der abgeleiteten Diskretisierung aus der bitmap. Der Schwerpunkt eines Hexagons besitzt demnach die Koordinaten

$$SP = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z - \frac{\Delta z}{2} \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

Daher liegt der dazugehörige Punkt $P_{i,j,k}$ vertikal über dem Schwerpunkt und in der oberen Fläche des Hexagons. Zwar entspricht die Verwendung eines Voxels nicht exakt der resultierenden Ist-Geometrie (super Ellipsoid) [Barui et al., 2020], jedoch bietet die Verwendung eines einfachen Körpers numerische Vorteile. Die ebenen, viereckigen

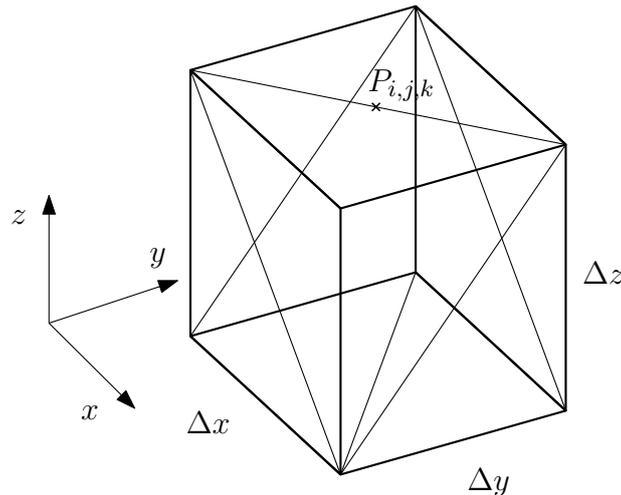


Abbildung 4.4.: Positionierung eines Voxel Grundkörpers ($l = \Delta x$, $b = \Delta y$, $h = \Delta z$) am Punkt $P_{i,j,k}$ für die Nachbildung der gedruckten STL-Datei.

Grundflächen des Hexagons bestehen jeweils aus zwei Oberflächendreiecken, womit maximal acht Dreiecke pro Voxel entstehen. Im Vergleich zu anderen Geometrien resultieren somit vergleichsweise wenige Knoten, Kanten und Netzelemente, wodurch der Speicherbedarf und die Netzgröße minimiert wird. Zusätzlich entstehen durch die gleichmäßige Rasterung der Datenpunkte und der Voxel bündige, bzw. stetige Übergänge zwischen den angrenzenden Instanzen, sodass keine komplexen Stellen trianguliert werden müssen.

4.2. Modellierung prozessspezifischer Materialkennwerte

Der Grünling besitzt, im Vergleich zu dem gesinterten Bräunling, unterschiedliche Materialeigenschaften. Nach dem Sintern besitzen die meisten Metalle ein duktiler Verhalten, mit einer elastischen und plastischen Verformung. Währenddessen entsteht durch die Bindung des Pulvers mit dem Bindemittel ein äußerst sprödes Material. Zu diesem Zeitpunkt wirken auf Partikelebene nur die Kapillarkräfte, weshalb die Bauteile eine geringere Festigkeit E und Härte (HV , HBW , HK) vor dem Sintern aufweisen. Die Festigkeit des Grünling nach dem Druckprozess ist abhängig von einer Vielzahl, zum Teil sich gegenseitig beeinflussenden, Parametern. Sowohl Prozessparameter wie, die Schichtdicke Δz , der Bindemittelauftrag, die Druckrichtung, die Aushärtezeit und die Sättigung¹, sowie die Werkstoffeigenschaften der beiden Ausgangswerkstoffe beein-

¹Die Sättigung [%] des Bindemittels gibt das Verhältnis zwischen dem Volumen des aufgetragenen Fluids zu dem freien Volumen im Pulver an [Mao et al., 2021].

flussen die letztendlichen mechanischen Eigenschaften des Grünlings. Nach [Oh et al., 2019] [Mariani et al., 2020] zeigen evaluierte Werkstoffproben der Grünlinge, je nach Orientierung des Prüfkörpers im Bauraum, unterschiedliche Festigkeiten. Aufgrund diesem Verhalten kann für das Bauteil ein anisotropes Werkstoffverhalten angenommen werden. Wie bei allen additiven Fertigungsverfahren wird das Bauteil Schichtweise generiert. Hierdurch entsteht die Vermutung, dass ein anisotropes Werkstoffverhalten nicht nur parallel und transversal zur Bewegungsrichtung im Grünling generiert wird, sondern zusätzlich auch zwischen den einzelnen Schichten. Somit entstehen unterschiedliche Festigkeitswerte in jeder Hauptrichtung x, y, z . Bisherige arbeiten [Oh et al., 2019] [Bafaluy Ojea et al., 2023] enthalten jedoch nur Messwerte für die x, y -Richtung und ohne die Möglichkeit weitere Werkstoffprüfungen durchzuführen, wird deshalb das Material nicht als orthotrop angenommen, sondern mit einer transversalen Isotropie modelliert. Als Symmetrieebene wird die gedruckte Schicht $\langle x, y \rangle$ verwendet, wodurch gilt $E_y = E_z$.

Mit dieser Annahme resultiert für die Elastizitätsmatrix C ein symmetrischer Tensor vierter Stufe

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{yz}}{1-\nu_{yz}-2\nu_{xy}\nu_{yx}} E_x & 2\nu_{xy}(\lambda + G_{yz}) & 2\nu_{xy}(\lambda + G_{yz}) & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2G_{yz} & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2G_{yz} & 0 & 0 & 0 \\ & & & G_{yz} & 0 & 0 \\ & & & & G_{xy} & 0 \\ & & & & & G_{xy} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

wobei für λ gilt

$$\lambda = \frac{\nu_{xy}\nu_{yx} + \nu_{yz}}{(1 - \nu_{yz} - 2\nu_{xy}\nu_{yx})(1 + \nu_{yz})} E_y. \quad (4.6)$$

Die 7 Materialkennwerte ($E_x, E_y, G_{xy}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{yz}$) können mit (4.7)-(4.9) durch fünf Materialparameter ($E_x, E_y, G_{xy}, G_{yz}, \nu$) bestimmt werden:

$$\nu_{xy} = \nu, \quad (4.7)$$

$$\nu_{yx} = \frac{E_x}{E_y} \nu, \quad (4.8)$$

$$\nu_{yz} = \frac{E_y}{2G_{yz}} - 1. \quad (4.9)$$

Der Vollständigkeit halber, wird an dieser Stelle die Notation in symbolischer Form (\parallel, \perp) aufgeführt, da diese in der Literatur häufig verwendet wird:

$$E_x = E_{\parallel}, E_y, E_z = E_{\perp}, G_{xz}, G_{yz} = G_{\parallel}, G_{xy} = G_{\perp}, \quad (4.10)$$

wobei G, E dem Schubmodul bzw. E-Modul in axialer und transversaler Richtung entsprechen. Das Schubmodul G ergibt sich aus

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (4.11)$$

4.3. Vernetzung

Hauptkriterium für die räumliche Diskretisierung ist die Integration in den automatisierten Ablauf der Greifpunktbewertung. Daher, wird an dieser Stelle ein möglichst robustes Vernetzungsmodul verwendet. Zwar soll die Vernetzung stabil und für unterschiedlichste Bauteile anwendbar sein, jedoch darf die Genauigkeit nicht zu sehr eingeschränkt werden. Ist dies der Fall, weicht die numerische Lösung zu stark von der analytischen Lösung des Problems ab. Unter diesen Voraussetzungen wird zur Diskretisierung das *Python*-Modul *TetGen v. 0.6.0* [Si, 2015] verwendet, um ein tetragonales Netz der Domäne Ω zu erstellen. Je nach Größe der Simulationsdomäne kann die zulässige Elementgröße V_{el} individuell angepasst werden. Aufgrund der gesetzten Kriterien sollte V_{el} relativ klein gewählt werden. Hierdurch steigt zwar die Anzahl der Elemente und Rechenoperationen, allerdings müssen weniger Anpassungen der Vernetzungsparameter vorgenommen werden.

4.4. Mathematische Formulierung der Belastungsanalyse für additiv gefertigte Bauteile

Während der Handhabung wirken am Bauteil unterschiedliche Lasten, die bei der Belastungsanalyse berücksichtigt werden müssen. An den Kontaktstellen zwischen Bauteil und Endeffektor wirken Normalkräfte F_N in Richtung der Flächennormale \vec{n} am Endeffektor und sichern das Bauteil im Endeffektor (siehe Kapitel 4.4.2). Zusätzlich treten während der Bewegung des Endeffektors Trägheitskräfte (siehe Kapitel 4.4.3) im

Bauteil auf, die proportional zur existierenden Beschleunigung \vec{a} sind.

Basis für beide Berechnungen ist die Formulierung der Partiellen Differentialgleichung (engl. Partial Differential Equation) (PDE) in schwacher bzw. variationeller Form (siehe Kapitel 4.4.1). Je nach Werkstoff und Fertigungsverfahren treten individuelle Werkstoffeigenschaften auf, mit unterschiedlichen Ausfallkriterien. Für die Modellierung wird angenommen, dass das eingebrachte Bindemittel und Pulverpartikel in einem Vollmaterial, ohne Poren, resultiert. Unter dieser Annahme kann der Grünling mit dem linear-elastischen Materialgesetz modelliert werden. Zur Formulierung und Lösung der PDE, sowie der Berechnung der entstehenden Spannungen wird das Modul *SfePy v. 2021.4* [Cimrman et al., 2019] verwendet. Für die Lösung des mathematischen Problems werden lineare Ansatzfunktionen verwendet und ein nichtlineares Newtonverfahren, welches in jedem Schritt einen linearen Löser verwendet.

4.4.1. Schwache Form der PDE für linear elastisches Materialverhalten

Als Ausgangspunkt für die Herleitung der schwachen Form der PDE für linear elastisches Verhalten dienen (4.12), (4.13) und (4.14). Die Gleichgewichtsbedingung aus der Impulsbilanz im statischen Fall, setzt sich zusammen aus dem Spannungstensor σ und den wirkenden Körperkräften f

$$\operatorname{div} \sigma + f = 0. \quad (4.12)$$

Die resultierende Dehnung ϵ wird durch die Verformung u beschrieben

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \quad (4.13)$$

und da linear elastisches Materialverhalten angenommen wird, kann das Materialgesetz mit einer elastischen Feder modelliert werden

$$\sigma = C \cdot \epsilon, \quad (4.14)$$

wobei C die Steifigkeitsmatrix für ein anisotropes Material beschreibt und einen Tensor vierter Stufe repräsentiert. Nun wird das Prinzip der virtuellen Arbeit angewendet und

eine virtuelle Verschiebung \tilde{u} auf [4.12](#) angewendet

$$-\nabla \cdot \sigma \cdot \tilde{u} = f \tilde{u}. \quad (4.15)$$

Anschließend wird die Verschiebung über das ganze Volumen generalisiert und der Satz von Green angewendet

$$\int_{\Omega} \nabla \tilde{u} \cdot \sigma(u) = \int_{\partial\Omega} \tilde{u} \cdot (\sigma(u) \cdot n) + \int_{\Omega} \tilde{u} \cdot f. \quad (4.16)$$

Auf der linken Seite kann die Verformung durch die Dehnung $\epsilon(\nabla \tilde{u})$ ersetzt werden, sodass dort die Dehnungsenergie resultiert

$$\int_{\Omega} \epsilon(\nabla \tilde{u}) \cdot \sigma(u) = \int_{\partial\Omega} \tilde{u} \cdot (\sigma(u) \cdot n) + \int_{\Omega} \tilde{u} \cdot f. \quad (4.17)$$

Die Terme auf der rechten Seite beschreiben die Spannung auf dem Rand der Domäne und die wirkende externen Körperkräfte. Darstellung [4.17](#) stellt schon eine schwache Form der [PDE](#) dar, jedoch muss das Materialgesetz [4.14](#) für linear elastisches Verhalten noch berücksichtigt werden:

$$\int_{\Omega} \epsilon(\nabla \tilde{u}) \cdot \sigma(u) = \int_{\Omega} \epsilon(\nabla \tilde{u}) \cdot (C \cdot \epsilon(u)), \quad (4.18)$$

sodass die schwache Form der [PDE](#) für linear elastische Materialien resultiert

$$\int_{\Omega} \epsilon(\nabla \tilde{u}) \cdot (C \cdot \epsilon(u)) = \int_{\partial\Omega} \tilde{u} \cdot (\sigma(u) \cdot n) + \int_{\Omega} \tilde{u} \cdot f. \quad (4.19)$$

4.4.2. Randbedingungen für den statischen Belastungsfall

Den ersten Fall der mechanischen Greifpunktbewertung stellt die Bauteilbelastung in Folge der statisch wirkenden Kräfte dar. In den Kontaktstellen zwischen Endeffektor und Bauteil wirken Normalenkräfte F_N auf das Bauteil, die zu Verformungen und Spannungen führen.

Damit das lineare Gleichungssystem der [FEM](#) lösbar ist, müssen Randbedingungen gesetzt werden. Meist werden diese Restriktionen durch den Bediener manuell festgelegt, müssen aber in einem automatisierten Ablauf dynamisiert werden. Hierfür werden Hilfsgeometrien verwendet und die entsprechenden Einträge aus dem Rand $\partial\Omega$ der

Simulationsdomäne selektiert (siehe Abb. 4.5). Da in der FEM die Lösungen an den Knoten des Netzes berechnet wird, werden diese mit den Hilfsobjekten selektiert. Hierfür werden die Koordinaten aller Knotenpunkte P_i , $\forall i \in \partial\Omega$ untersucht. Mit den Hilfsobjekten werden Räume im R^3 aufgespannt, in denen die Knotenpunkte für die Randbedingungen selektiert werden. Alle Punkte P_i , die sich innerhalb des aufgespannten Raumes oder auf dessen Rand befinden, werden für diese Randbedingung selektiert. Die Hilfsobjekte stellen einfache geometrische Objekte in Form von Hexaedern, bestehend aus dreiseitigen Prismen, dar und besitzen somit eine geringe Anzahl N an eigenen Eckpunkten V_k ($k = 1, \dots, N$). Die Hilfsobjekte sind zudem konvexe Geometrien, weshalb eine lineare Optimierung für die Klassifizierung verwendet wird. Jeder Punkt P_i liegt innerhalb der Hilfsgeometrie, wenn er als Linearkombination der Eckpunkte V_k dargestellt werden kann:

$$\sum_{j=1}^K \lambda_j V_j = P_i, \text{ mit } \lambda_1, \dots, \lambda_K \geq 0 \text{ und } \sum_j \lambda_j = 1. \quad (4.20)$$

In Matritzenschreibweise resultiert daraus

$$V \cdot \vec{\lambda} = \vec{P}, \quad (4.21)$$

wobei V die Eckpunkte V_k ($1, \dots, N$) enthält und einer $3 \times N$ Matrix entspricht. Da das Problem keine Kostenfunktion enthält zählt es zu den linearen Machbarkeitsproblemen, d.h. nicht die optimale Lösung ist relevant, sondern nur die Existenz einer Lösung. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen resultiert für das Optimierungsproblem

$$\begin{bmatrix} V_{1,x} & V_{2,x} & \dots & V_{N,x} \\ V_{1,y} & \ddots & & V_{N,y} \\ V_{1,z} & & \ddots & V_{N,z} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{i,x} \\ P_{i,y} \\ P_{i,z} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4.22)$$

4.4.2.1. Geometrische Randbedingungen

Aufgrund des spröden Materialverhaltens (siehe Kapitel 4.2) der Grünlinge nach dem Druck kann angenommen werden, dass nur kleine Verformungen u und somit auch nur geringe Dehnungen ϵ in Folge der Belastung auftreten. Daher, wird eine feste Einspannung am Rand des Objektes, möglichst weit entfernt von den extern aufgebrachten Kräften, gesetzt. Für die Selektion der Knotenpunkte wird als Hilfsgeometrie ein Hexagon HO

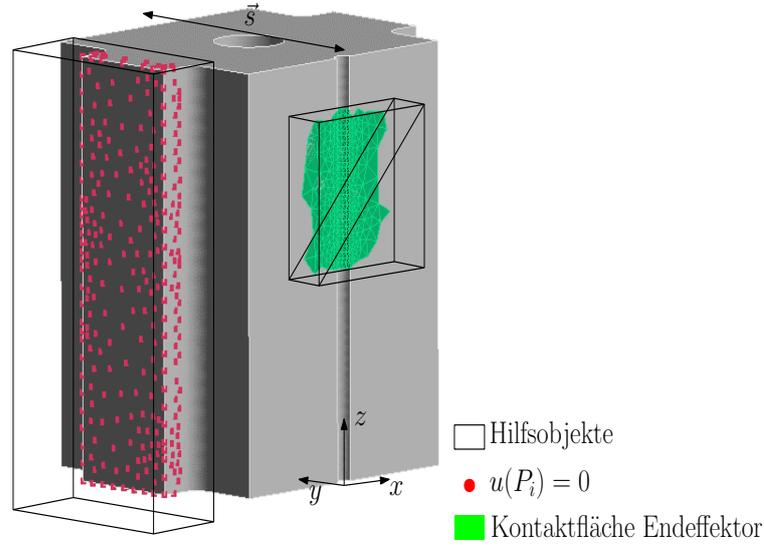


Abbildung 4.5.: Identifikation der geometrischen und mechanischen Randbedingungen anhand der Hilfsobjekte für den statischen Belastungsfall.

aufgespannt. Die Positionierung des Hexagons erfolgt mit Hilfe der Bewegungsrichtung \vec{s} des Endeffektors. Senkrecht zu \vec{s} werden aus Ω die räumlichen Extrema bestimmt. Hierfür wird der Anteil aller Knotenpunkte \hat{P}_i in Richtung \vec{s}_\perp bestimmt

$$\hat{P}_i = \frac{P_i \cdot \vec{s}_\perp}{\|\vec{s}_\perp\|}, \quad \forall i \in \partial\Omega. \quad (4.23)$$

Am resultierenden Maxima $\hat{P}_{i,max}$ wird das Hexaeder initialisiert und somit die Knotenpunkte für die Dirichlet-Randbedingung selektiert

$$u(P_i) = 0, \quad \forall i \in \partial\Omega \wedge HO. \quad (4.24)$$

4.4.2.2. Mechanische Randbedingungen

Für die Aufprägung der Normalkraft F_N des Greifers auf dem Handhabungsobjekt wird die triangulierte Form der Greiferfläche zur Hilfe genommen. Infolge der Greifpunktbestimmung, sind die Eckpunkte der Dreiecke für die Handhabungsposition bekannt und können somit als Initialisierungspunkte für die Hilfsobjekte verwendet werden. Die Dreiecke bilden die Grundfläche für triangulierte Prismen (siehe Abb. 4.5), die in Richtung \vec{s} extrudiert werden. Alle vollständig enthaltenen Flächen aus $\partial\Omega$ innerhalb der Hilfsgeometrie werden als Neumann-Randbedingung selektiert

$$F(P_i) = F_N, \quad \forall i \in \partial\Omega \wedge HO. \quad (4.25)$$

Mit diesen Randbedingungen resultiert für [4.19](#)

$$\int_{\Omega} \epsilon(\nabla \tilde{u}) \cdot (C \cdot \epsilon(u)) = \int_{\Gamma_1} F_{N,1} \cdot \tilde{u} + \int_{\Gamma_2} F_{N,2} \cdot \tilde{u}, \quad (4.26)$$

wobei $\Gamma_{1,2}$ die Angriffspunkte der externen Kräfte $F_{N,1,2}$ spezifizieren.

4.4.3. Randbedingungen für den dynamischen Belastungsfall

Durch die Bewegung des Endeffektors während der Handhabung treten Beschleunigungen \vec{a} und somit Trägheitskräfte F_T auf. Je nach Dynamik und Einstellung des Roboters können diese variieren und unterschiedlich groß sein. Hierfür sollte aus dem Datenblatt des Roboters die maximale Beschleunigung des Systems \vec{a}_{max} verwendet werden. Für die Selektion der Randbedingungen werden, ähnlich wie im statischen Belastungsfall, geometrische Hilfsobjekte zur Identifikation der Knoten verwendet.

4.4.3.1. Geometrische Randbedingungen

Als Dirichlet-Randbedingung wird die Kontaktfläche zwischen Greifer und Handhabungsobjekt verwendet (siehe Abb. [4.6](#)). Hierfür wird, äquivalent zum statischen Fall, die diskretisierte Greiferfläche als Grundfläche des triangulierten Prisma verwendet. Im dynamischen Belastungsfall wird ein stabiler Griff angenommen. Dies bedeutet, dass während der gesamten Bewegung keine Relativbewegung zwischen Objekt und Endeffektor auftritt. Daraus resultiert als Forderung für die Reibkraft $F_R > F_T$. Die resultierende Reibkraft ist also stets größer als die Trägheitskraft F_T .

4.4.3.2. Mechanische Randbedingungen

Während im statischen Belastungsfall die Belastung durch die Greiferbacken und den Vektor \vec{s} a priori definiert ist, hängt die Richtung der Beschleunigung von der Bahnplanung des Roboters ab. Da die Trajektorie zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt ist werden mehrere Beschleunigungsvektoren $\vec{a}_{1,\dots,6}$ betrachtet. Die sechs Beschleunigungen sind in Tupeln angeordnet, sodass zwei Vektoren immer auf der gleichen Gerade liegen aber genau in die entgegengesetzte Richtung zeigen (siehe Abb. [4.6](#)). Initialisierungsvektoren für die Beschleunigungsrichtung stellen die Basisvektoren des globalen Koordinatensystems $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ dar. Die Beschleunigungen entsprechen diesen Richtungen und bilden somit eine Belastung in jede Hauptrichtung des \mathbb{R}^3 . Zusätzlich zu den Beschleunigungen aus der Bewegung des Endeffektors wirkt die Erdbeschleunigung

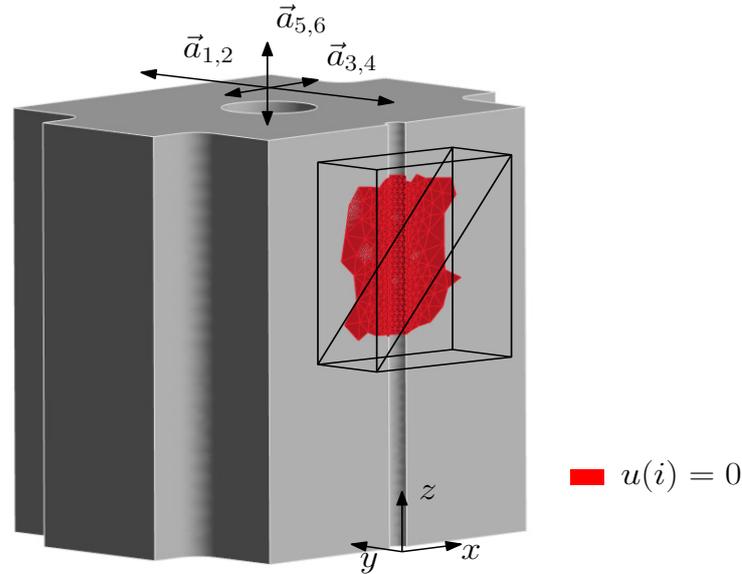


Abbildung 4.6.: Identifikation der geometrischen und mechanischen Randbedingungen anhand der Hilfsobjekte für den dynamischen Belastungsfall mit den Beschleunigungen $\vec{a}_{1,\dots,6}$.

g in negative z -Richtung, wodurch für die Gesamtbeschleunigung \vec{a}_{Ges} resultiert

$$\vec{a}_{Ges} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} + \vec{a}_i, \text{ mit } i \in \{1, \dots, 6\}. \quad (4.27)$$

4.5. Bewertung der Bauteilbelastung Q_S

Resultat der **FEM** sind die Verschiebungen u aus denen die Dehnungen ϵ und mit dem linear elastischen Materialgesetz **4.14** die Spannungen $\underline{\sigma}$ berechnet werden. In jedem Knoten resultiert daraus der Cauchy-Spannungstensor mit 9 Einträgen (Normalspannungen σ + Schubspannungen τ)

$$\underline{\sigma}_i = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \forall i \in \Omega. \quad (4.28)$$

Mit Hilfe des charakteristischen Polynoms $\chi_{\underline{\sigma}}(\lambda) = \det(\underline{\sigma} - I\lambda)$ können die Hauptspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ des Spannungstensors $\underline{\sigma}$ bestimmt werden. In den Hauptspannungsrichtungen liegen keine Schubspannungen vor, d. h. $\tau = 0$ und die Hauptnormalspannungen nehmen ihren maximalen Wert an. Somit resultiert für den Spannungstensor im Haupt-

spannungssystem

$$\underline{\sigma}_{HS} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}. \quad (4.29)$$

Der Spannungstensor charakterisiert zwar genau den Spannungszustand in jedem Punkt eignet sich aufgrund der vielen Einträge nicht direkt für die Bewertung der Bauteilbelastung Q_S . Daher wird eine Vergleichsspannung σ_v aus dem Spannungstensor gebildet, welche den Spannungszustand in einem Wert beschreibt und einen Vergleich mit den Werten aus dem einachsigen Zugversuch ermöglicht.

4.5.1. Spannungen Q_σ

Damit eine Aussage über die wirkende Spannung möglich ist, werden typischerweise Ausfallkriterien angewendet, um eine Ausfallwahrscheinlichkeit zu prognostizieren. Aufgrund der vorhandenen Einflussparameter und der somit resultierenden Anzahl an Freiheitsgraden muss für jedes Material und Druckparameter ein individuelles Ausfallkriterium anhand von Experimenten erstellt werden. Ist ein Kriterium spezifiziert kann die Qualitätsmetrik, aus dem Verhältnis zwischen wirkender Spannung σ_i und maximal zulässiger Spannung σ_{max} gebildet werden

$$Q_\sigma = \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} \quad (4.30)$$

Da das Material äußerst Spröde ist resultiert nur eine sehr geringe plastische Verformung, womit als mechanischer Grenzwert die Streckgrenze $\sigma_{max} = R_e$ verwendet wird.

4.5.2. Kombinierte mechanische Belastung

Neben der Spannung können weitere Qualitätskriterien Q_n für das Ranking der Greifpositionen integriert werden. Diese werden durch eine partielle Gewichtung zu einem Evaluationskriterium zusammengeführt und ein Qualitätskriterium Q_S für die Bauteilbelastung gebildet

$$Q_S = w_1 \cdot Q_\sigma + \sum_{n=2}^N w_n \cdot Q_n, \quad \text{mit} \quad \sum_{n=1}^N w_n = 1, \quad w_n \geq 0, \quad (4.31)$$

wobei die partiellen Gewichte w_i je nach Präferenz des Anwenders gewählt und adaptiert werden können. Überschreitet eine Handhabungsposition einen der Grenzwerte

$$Q_n \geq 1 \text{ GP} == \textit{False}, \quad (4.32)$$

wird der Greifpunkt aus dem Lösungsraum entfernt und für die weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt.

5. Erzeugung eines virtuellen Bauraums und Ableitung der Handhabungsreihenfolge

Durch die offline durchgeführte Berechnung aus Kapitel 3 und 4 stehen die bewerteten Greifpunkte für die gedruckten Bauteile zur Verfügung. Damit die Daten im Produktionsbetrieb verwendet werden können, müssen zunächst die realen Anlagendaten bereitgestellt werden (siehe Kapitel 5.1). Je nach Bauraumgröße und Zusammensetzung des Auftrages ist eine Vielzahl unterschiedlicher Handhabungsobjekte vorhanden. Zur Differenzierung und Quantifizierung der Auftragszusammensetzung werden die einzelnen Bauteile in einem ersten Schritt identifiziert (siehe Kapitel 5.2). Da die Lage der Bauteile, im Vergleich zur ursprünglichen STL-Datei, im Präprozessor verändert wird, werden die offline generierten Daten transformiert (siehe Kapitel 5.3). Nach der Zuweisung der offline- und online-Daten befinden sich beide Systeme im gleichen Zustand. Der virtuelle Bauraum gleicht dem realen Abbild in der Produktionsanlage. Aufgrund der Lage im Bauraum sind nicht alle Handhabungspositionen erreichbar und müssen deshalb anhand geometrischer Randbedingungen überprüft werden (siehe Kapitel 5.4). Nach dieser Überprüfung liegt eine Entnahmereihenfolge vor, die vom Entnahmesystem ausgeführt werden kann. Der gesamte Ablauf, von den bereitgestellten bitmaps bis hin zur letztendlichen Entnahmereihenfolge ist in Abb. 5.1 dargestellt.

5.1. Rekonstruktion der Daten aus dem Präprozessor

Vergleichbar zu Kapitel 4.1.1 dienen als Eingangsdaten die erzeugten bitmaps aus dem Präprozessor zur Rekonstruktion des virtuellen Bauraums. Zusammen mit dem Abstand zweier Pixel aus 4.1 und der Schichtdicke Δz kann somit die Szene vollständig mit allen Objekten abgebildet werden. Durch die Rekonstruktion des Bauraums, basierend auf den Graustufen der Pixel resultiert ein Punktwolke, in der alle Einträge Bestandteil eines

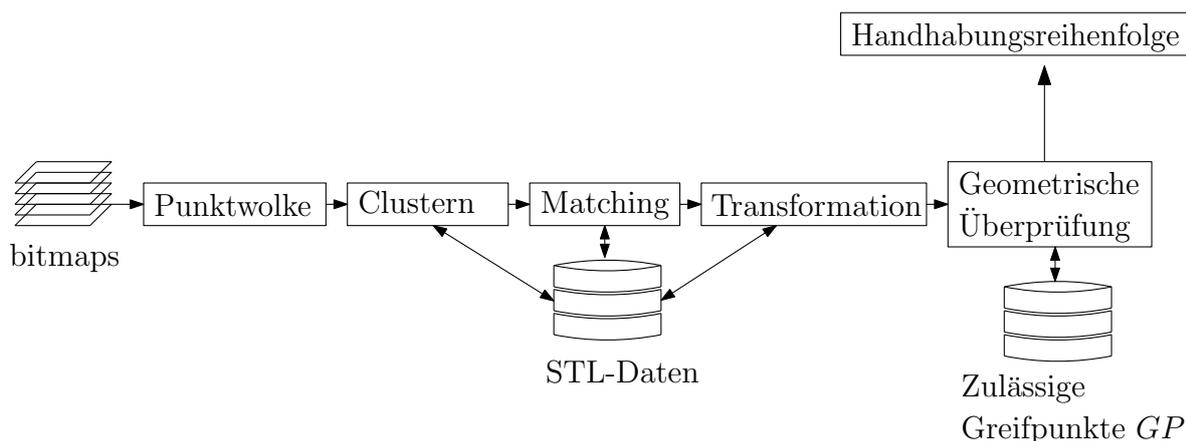


Abbildung 5.1.: Schematischer Ablauf der Datenrekonstruktion, -transformation und der Ableitung der Enthamereihenfolge im **B.I.** Aus den bitmaps werden Punktwolken und Objektcluster abgeleitet und anschließend den STL-Dateien zugewiesen. Nach der Zuteilung werden die Daten transformiert und eine Handhabungsreihenfolge bestimmt.

gedruckten Bauteils sind. Zu diesem Zeitpunkt wird jedoch nicht unterschieden, welcher Punkt, zu welchem Bauteil gehört. Unterschiedliche Bauteile sind in den bitmaps zwar für den Anwender anhand der lokalen Verdichtung erkenntlich, besitzen allerdings keine unterschiedliche Kodierung (**RGB**-Wert) und müssen somit beim Einlesen in einem zusätzlichen Schritt separiert werden.

5.2. Identifikation der Handhabungsobjekte

Die Identifikation der Handhabungsobjekte aus den Anlagendaten stellt einen zweistufigen Prozess dar. Nach dem Einlesen der bitmaps werden aus der Punktwolke zunächst die enthaltenen Objekte vereinzelt (siehe Kapitel **5.2.1**). Hierfür werden Cluster initialisiert und alle Punkte einer Klasse zugeordnet. Nach der Segmentierung der Szene in einzelne Objekte kann eine Objekterkennung (siehe Kapitel **5.2.2**) zwischen den offline Daten (STL-Dateien) und den Clustern durchgeführt werden.

5.2.1. Bildung von Objektclustern anhand des Punktabstandes

Aus der Punktwolke PW werden zunächst alle Einträge p_i (siehe **4.2**) eingelesen und ein Downsampling durchgeführt, um die Anzahl an Einträgen zu reduzieren. Da die Einträge nach dem sequentiellen Einlesen in geordneter Reihenfolge sind, werden die Punkte vor dem Downsamplen in einer zufälligen Reihenfolge angeordnet. Zusätzlich

zu den bitmaps sind keine weiteren Metadaten vorhanden, sodass a priori die genaue Anzahl der Bauteile unbekannt ist. Dadurch, dass die Anzahl der Cluster/Klassifikatoren nicht determiniert ist können partitionierende Clustermethoden wie k-means, k-medoids nicht angewendet werden. Aus diesem Grund wurde ein r agglomerativer Clustering Algorithmus mit der L2-Norm als Distanzmaß verwendet. Anhand des Kriteriums der euklidischen Distanz wird um jeden Eintrag in der Punktwolke eine Kugel mit dem Radius r_{min} gebildet (siehe Abb. 5.2).

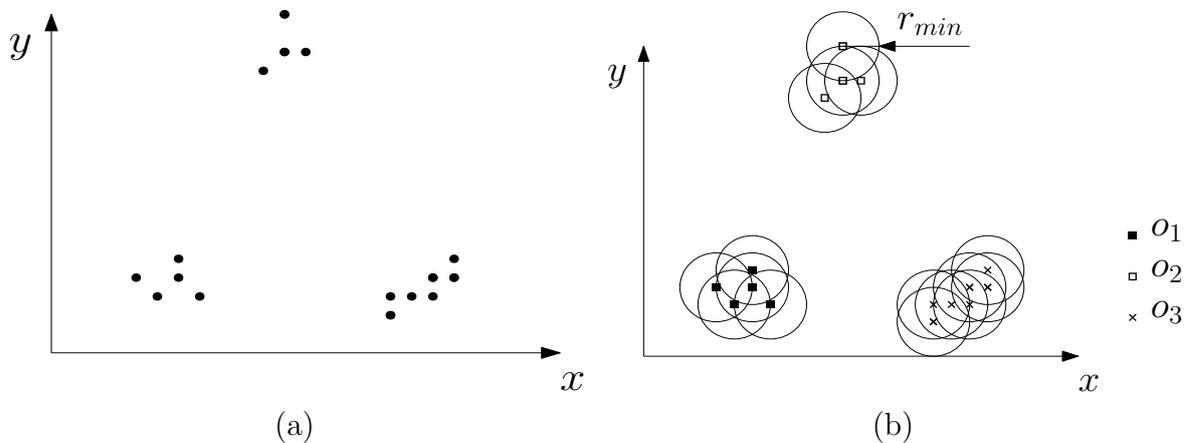


Abbildung 5.2.: Segmentierung der Punktwolke in Objekte. (a) Ursprüngliche Verteilung der Einträge in \mathbb{R}^2 (b) Klassifikation nach der euklidischen Distanz r_{min} und den daraus resultierenden Clustern $o_{1,2,3}$.

Iterativ werden nun alle Punkte p_i , die das Distanzmaß erfüllen, zu einem Cluster zusammengeführt $o_i \subseteq P$. Abbruchkriterium des Klassifikators ist eine leere Menge \emptyset an Eingangspunkten, d.h. wenn alle Punkte einem Cluster zugewiesen sind. Der Algorithmus entspricht einem ein Parameter Modell, weshalb die Wahl der minimalen Distanz zwischen zwei Punktclustern r_{min} die Güte des Ergebnisses entscheidend beeinflusst. Wird der Abstand zu klein gewählt, werden zu viele Cluster gebildet und mehr Objekte detektiert als eigentlich vorhanden sind. Ist der Parameter zu groß gewählt werden Punkte, die nicht auf dem Objekt liegen, trotzdem zum Cluster hinzugefügt und somit zu wenige Objekte detektiert. Eine detailliertere Aufführung der Grenzwerte für das [B.J](#) ist in [A.1](#) gegeben. Nach der Klassifikation der Einträge in der Punktwolke entspricht die Anzahl der Klassen der Anzahl an Objekten im Bauraum T .

5.2.2. Objekterkennung aus den rekonstruierten Anlagendaten

Nach dem Erzeugen der Cluster sind alle Punkte separiert und in einem Bauteil gruppiert und können einer STL-Datei zugewiesen werden. Da die Daten in der STL-Datei und im Cluster in unterschiedlichen Formaten vorliegen, können beide Datensätze nicht direkt miteinander verglichen werden. Die Repräsentation des Bauteils im Cluster als diskretisierte Punkte schließt zudem die Anwendung von STL-Transformatoren aus. Ohne Information über die Außenfläche, Kanten und Verbindungen liefert eine STL-Rekonstruktion inkonsistente Ergebnisse, in der die Geometrie des Bauteils schlecht approximiert wird und somit die anschließende Objekterkennung fehlerhaft wird.

Auch die in [4.1.2](#) und [4.1.3](#) erstellte STL-Datei zur mechanischen Bewertung des Bauteils ist für die Objekterkennung ungeeignet, da je nach Füllstruktur ein signifikanter Unterschied zwischen dem gedruckten Bauteil und der ursprünglichen STL-Datei bestehen kann. Mit der gewählten Füllstruktur (siehe Abb. [4.2](#)) resultieren bspw. für Testobjekt (a) (siehe Abb. [6.3](#)) 38209 Voxel und somit ein Volumen $V_{rek} = 0.208 \text{ mm} \cdot 0.208 \text{ mm} \cdot 0.5 \text{ mm} \cdot 38209 = 826.54 \text{ mm}^3$. Im Gegensatz dazu besitzt die ursprüngliche STL-Datei ein Volumen von $V_{STL,1} = 4188.79 \text{ mm}^3$. V_{rek} entspricht nur ca. 20 % von $V_{STL,1}$ und kann deshalb nicht für die Objektidentifikation verwendet werden. Bei einem anderen Muster kann diese Differenz geringer ausfallen, jedoch entsteht nur bei einer vollständigen Füllung ein identisches Volumina.

Daher werden sowohl die STL-Datei als auch die Objektcluster o_i transformiert, um eine Objekterkennung durchzuführen. Hierfür wird angenommen, dass die Hüllkörper aus beiden Datensätzen eine vergleichbare Geometrie aufweisen und somit deren Volumina einen ähnlichen Wert annimmt. Als Hüllkörper wird für beide Datensätze die konvexe Hülle gebildet und deren Volumina V berechnet. Anschließend wird für jedes Objektcluster o_i in den STL-Dateien die geringste Abweichung bestimmt.

$$o_i = o(\min\{|V_{STL} - V_{o_i}|\})_{STL} \quad \forall i \in T. \quad (5.1)$$

5.3. Transformation der offline geneierten Produktdaten

Aufgrund der veränderten Lage und Orientierung der Bauteile im Bauraum verglichen mit der STL-Datei können die berechneten Greifpunkte (siehe Kapitel [3](#)) nicht direkt übernommen werden. Für die spätere Anwendung müssen die Greifpunkte zur tatsächlichen Objektlage ausgerichtet und transformiert werden. Als Annahme, wird wie in Kapitel [3.2.3](#), jedes Objekt als Starrkörper angenommen.

Auf Basis beider Datensätze wird die affine Transformation der STL-Datei zum dazugehörigen Objektcluster o_i bestimmt. Zur Bestimmung der Transformation $T_{STL \rightarrow o_i} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ zwischen beiden Objekten wird der ICP-Algorithmus [Zhang, 2014] verwendet. Mittels eines iterativen Vorgehens minimiert der ICP-Algorithmus den Abstand zwischen beiden Datensätzen und erzeugt somit Transformationen.

Zur Verbesserung der Laufzeit und der Konvergenz des ICP-Algorithmus werden beide Datensätze angeglichen, sodass die Anzahl an Knoten in der konvexen Hülle identisch ist. Es gilt also $|CH(o_i)| = |CH(STL)|$.

Ist die Transformation $T_{STL \rightarrow o_i}$ nun bekannt, können die STL-Dateien und Handhabungspositionen transformiert werden, sodass die Daten in der virtuellen Rekonstruktion der realen Produktionsumgebung entsprechen.

5.4. Ableitung der Handhabungsreihenfolge

Im Anschluss an das Matching der offline Daten mit den Produktionsdaten liegen die Handhabungspositionen in aktualisierter Form vor und können für die Erstellung der Handhabungsreihenfolge verwendet werden. Zur Verfügung stehen die Kontaktpositionen, sowie das Qualitätskriterium Q_S für die Auswahl einer geeigneten Greifposition. Um ein möglichst umfassendes Set an Handhabungspositionen zu generieren besteht in Kapitel 3 keine geometrischen Restriktionen für die Erreichbarkeit. Aufgrund der Vielzahl an Greifpunkten wird zunächst eine Selektion vorgenommen und der Lösungsraum eingeschränkt (siehe Kapitel 5.4.1), damit die Berechnungszeit reduziert wird. Anschließend können die geometrischen Randbedingungen (siehe Kapitel 5.4.2) gesetzt und die Auswahl und Reihenfolge der anzufahrenden Greifpunkte bestimmt werden (siehe Kapitel 5.4.3).

5.4.1. Downsampling der Greifpunkte

Um die Anzahl der Greifpunkte zu reduzieren wird ein Downsampling anhand der Qualitätsmetrik Q_S durchgeführt. Aus dem Set aller Greifpunkte werden für jedes Objekt n -Werte mit dem höchsten Q_S -Wert selektiert. Ohne diese Selektion werden ansonsten alle Einträge überprüft. Durchgeführte Tests zeigten hierfür einen enormen Anstieg der Laufzeit ohne eine Verbesserung des Ergebnisses, weswegen das Downsampling durchgeführt wird.

5.4.2. Geometrische Randbedingungen

Kriterien für die Selektion der Greifpunkte aus dem bereitgestellten Lösungsraum sind geometrische Restriktionen, die eingehalten werden müssen. Diese stellen sicher, dass keine Kollisionen mit anderen Objekten und dadurch Beschädigungen sowie nicht detektierte Positionsänderungen entstehen. In einem realen Produktionsszenario beinhaltet ein Druckauftrag mehrere Bauteile, oft auch mit unterschiedlichen Geometrien. Deswegen muss die geometrische Absicherung nicht nur für ein einzelnes Bauteil im Bauraum ausgelegt sein, sondern auch für mehrere Volumenkörper. Aus dem typischen Produktionsszenario werden die folgenden Kriterien abgeleitet:

- Eingeschränkte Zugänglichkeit des Druckbereichs (siehe Kapitel [5.4.2.1](#))
- Entnahme der Bauteile von oben aus der z -Richtung (siehe Kapitel [5.4.2.2](#))
- Kollisionsvermeidung mit anderer Bauteile (siehe Kapitel [5.4.2.3](#))
- Keine Positionsveränderungen anderer Bauteile (siehe Kapitel [5.4.2.4](#))

Für die Kollisionsüberprüfung werden ausgerichtete Hüllkörper (engl. oriented bounding boxes) aus einfachen Volumenkörpern verwendet. Diese zeigen eine gute Approximation der beinhalteten Bauteile und ermöglichen gleichzeitig eine numerisch effiziente Überprüfung.

5.4.2.1. Einbettung in den virtuellen Druckbereich

Je nach eingesetzter Anlage und Auslegung des Produktionssystems können unterschiedliche Restriktionen für den Eingriff in den Druckbereich resultieren. Nach dem Druck und der Öffnung des Bauraums sind die Bauteile seitlich und von oben zugänglich, von unten ist die Zugänglichkeit durch die Grundplatte beschränkt. Zum Einsatz kommen allerdings auch automatisierte Materialflusslösungen mit Druckcontainern. Bei diesen Lösungen ist der seitliche Eingriff nicht möglich, sondern nur die Entnahme von oben. Daher, wird ein virtueller Druckbereich erzeugt mit dem der Zugang des Roboters zu den Bauteilen eingeschränkt wird (siehe Abb. [5.3](#)). Als Wände dienen Hexaeder, die den Druckbereich begrenzen und für die Kollisionserkennung verwendet werden. Je nach Konfiguration des Produktionssystems können somit individuelle Randbedingungen gesetzt werden. Ist nur ein Bauteil im Bauraum vorhanden, reicht diese Randbedingung aus. Bei mehreren Bauteilen gelten zusätzlich die nachfolgenden Restriktionen.

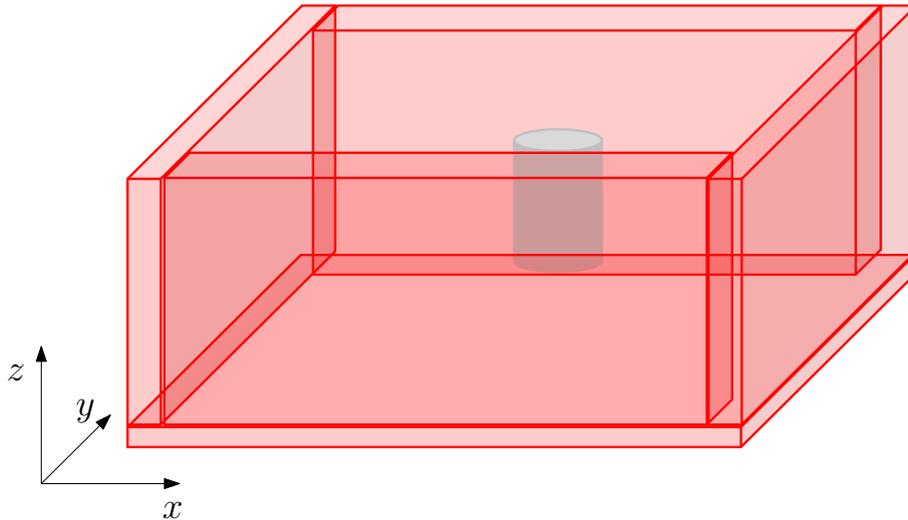


Abbildung 5.3.: Erzeugung eines virtuellen Druckbereichs durch Hexaeder an den Seitenwänden (rot) für die einseitige Zugänglichkeit der gedruckten Bauteile (grau) im Bauraum.

5.4.2.2. Top-Down Prinzip für die Entnahme der Objekte

Für die Entnahme der Bauteile wird ein kaskadenförmiges Vorgehen integriert, sodass die Bauteilentnahme der Abtragung aus einer Richtung entspricht. In dem betrachteten Szenario sind die Bauteile nur aus der z -Richtung, also von oben zugänglich. Daher wird ein Top-Down-Prinzip verwendet, indem die Bauteile in Richtung der z -Achse entfernt werden. Grundsätzlich kann die Richtung jedoch frei gewählt werden und z. B. auch der x oder y -Richtung entsprechen. Als Vorbereitung für die Entnahme in z -Richtung werden alle Objekte $o_i \in O$ in die $\langle xz \rangle$ -Ebene projiziert und die Ränder in z -Richtung bestimmt (siehe Abb. 5.4). Anhand der z -Werte, der projizierten Bauteile \hat{o}_i , erfolgt eine Sortierung der Bauteile für die Top-Down-Entnahme. Als Projektionsebene hätte ebenso die $\langle yz \rangle$ -Ebene zu einem identischen Ergebnis geführt. Wird als Primärrichtung bspw. die x -Richtung spezifiziert, müssen die Projektionsebenen ebenfalls angepasst werden ($\langle yx \rangle$, $\langle zx \rangle$).

Durch die Sortierung in z -Richtung wird immer das oberste Bauteil priorisiert. Sollte für dieses Objekt kein Greifpunkt gefunden werden, wird die sortierte Reihenfolge iterative abgearbeitet, bis ein zulässiger Greifpunkt identifiziert wird. Ist ein Greifpunkt validiert, wird das dazugehörige Objekt o_i aus der Liste entfernt und der Prozess erneut gestartet.

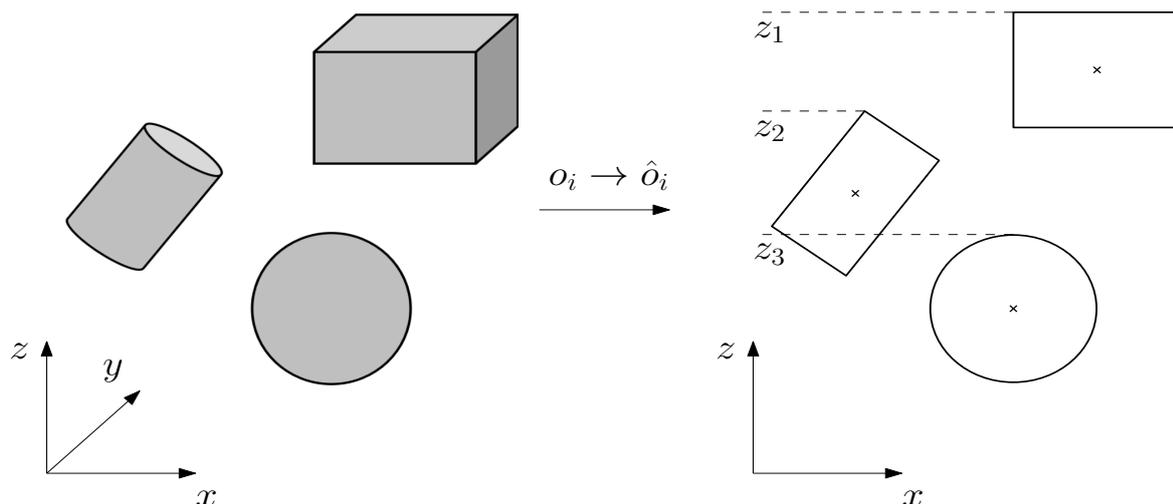


Abbildung 5.4.: Projektion $o_i \rightarrow \hat{o}_i$ dreier gedruckter Bauteile (grau) in die $\langle xz \rangle$ -Ebene und die daraus resultierende Sortierung (z_1, z_2, z_3) anhand des maximalen z -Wertes.

5.4.2.3. Statische und Dynamische Kollisionsanalyse mit weiteren Objekten im Bauraum

Anhand der priorisierten Bauteile werden die einzelnen Handhabungspositionen geometrisch überprüft. Hierfür wird an jeder Position, sowohl eine statische als auch eine dynamische Kollisionsüberprüfung durchgeführt. Als Hüllkörper für die Bauteile wird die konvexe Hülle verwendet und für den Greifer eine Kombination aus einfachen Volumenkörpern, sodass die Kollisionsüberprüfung möglichst recheneffizient ist. Für den Greifer ergibt sich eine gute Approximation des Volumina durch die Kombination von Zylindern und Hexaedern (siehe Abb. 5.5). Der Greifer wird an den definierten Handhabungspositionen instanziiert und anschließend eine Kollisionsanalyse durchgeführt. Sind die Kontaktstellen für den Greifpunkt nicht genau definiert, wird eine inkrementelle Rotation durchgeführt und mehrere Orientierungen evaluiert.

Durch die Validierung ist allerdings nur ein Teil des Handhabungsvorganges abgesichert. Nach [Souza et al., 2021] muss jedoch für eine vollständige Absicherung des Handhabungsvorgangs auch die Bewegung bewertet bzw. abgesichert werden. Für die Auf- und Entnahme des Bauteils wird die Bewegung des Endeffektors entlang eines linearen Vektors \vec{o}_θ geplant (siehe Abb. 5.5). Mit einer quasi dynamischen Bewegung werden Endeffektor und das Bauteil inkrementell in Richtung \vec{o}_θ verschoben und bei jeder Verschiebung eine statische Kollisionsüberprüfung durchgeführt. Die Translation t_i kann mittels 3.16 bestimmt werden. Die Verschiebung wird so lange ausgeführt, bis ein definierter Grenzwert erreicht ist. Tritt vor dem Endwert eine Kollision mit einem

anderen Objekt auf, ist die Handhabungsposition ungültig.

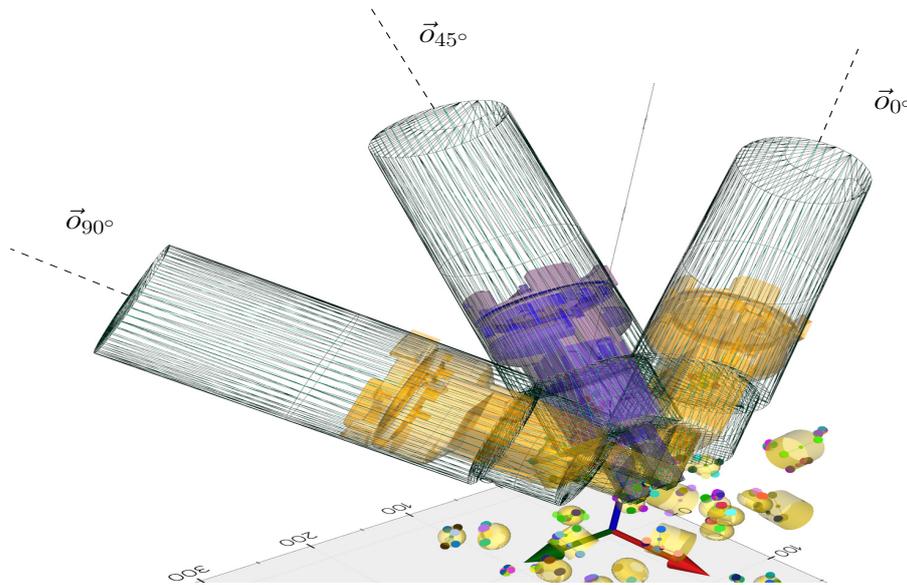


Abbildung 5.5.: Erzeugte Hüllkörper für die gedruckten Bauteile (gelb), sowie den Endeffektor in einer Greifposition mit unterschiedlichen Anfahrpositionen \vec{o}_θ , $\theta \in [0^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$.

5.4.2.4. Vermeidung von Kavitäten bei der Entnahme

Während das Bauteil durch das Bindemittel eine gewisse Festigkeit besitzt und externen Kräften widerstehen kann, liegen im ungebundenen Pulver wenig Bindungskräfte zwischen den einzelnen Partikeln vor. Durch die geringen Bindungskräfte zeigt das ungebundene Pulver eine ausgeprägte Fließfähigkeit infolge des wirkenden Eigengewichts, sodass entstehende Kavitäten im Bauraum gefüllt werden. Bei der Entfernung einzelner Objekte fließt nun Pulver in den entstehenden Hohlraum und kann zur Positionsveränderung einzelner Objekte führen.

Für eine detaillierte Evaluation ist die Kopplung an eine Simulation mittels der Diskreten Elemente Methode (**DEM**) notwendig, um die exakten Partikelbewegungen bestimmen zu können. Die Integration dieser Simulation würde an dieser Stelle allerdings den Umfang der Arbeit übersteigen und wird durch eine geometrische Randbedingung substituiert. Ziel ist es, Hohlräume unterhalb der Bauteile bei der Entfernung eines Bauteils zu vermeiden. In diese würde das ungebundene Pulver nachlaufen und eine Positionsänderung resultieren. Als geometrisches Hilfsobjekt wird ein Kegel (siehe Abb. **5.6**) unterhalb der Bauteile zur Überprüfung instanziiert. Der Hilfskegel wird für jedes Objekt mit vorgegebenem Durchmesser D_K und Höhe h_K erstellt. Tritt während

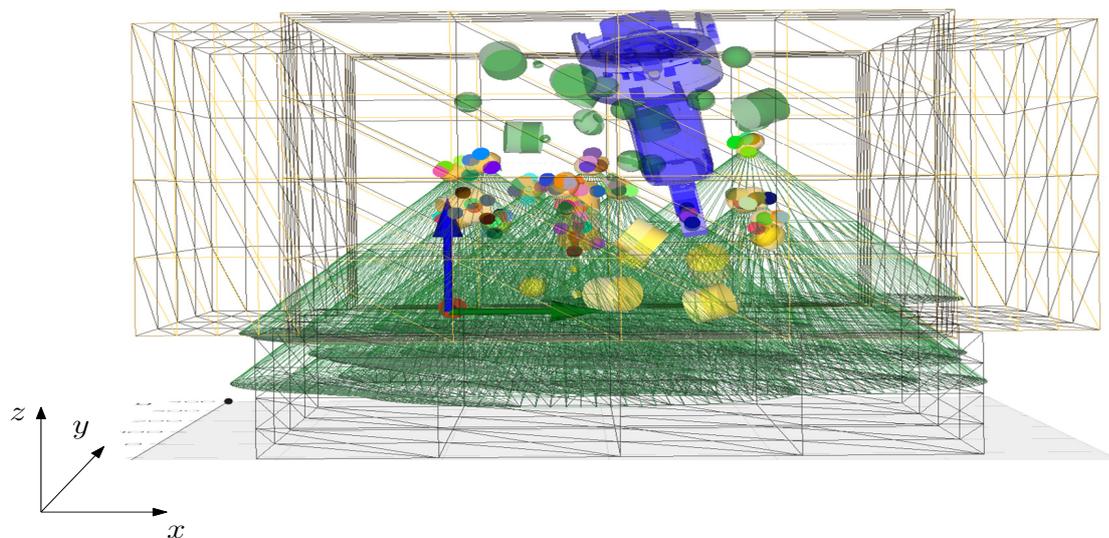


Abbildung 5.6.: Additiv gefertigte Bauteile mit aufgespannten Kegeln (grün) als Hilfsgeometrie im Digitalen Zwilling für die Vermeidung von Kavitäten im Bauraum.

der statischen oder quasi dynamischen Evaluation eine Kollision auf, entsteht in der realen Produktionsanlage ein Hohlraum und der Greifpunkt wird aus dem Lösungsraum entfernt.

5.4.3. Entnahmereihenfolge

Sind alle Kollisionsüberprüfungen negativ, treten also keine Kollisionen während des Handhabungsvorgangs auf, wird der erste gültige Greifpunkt übergeben. Nach der Identifizierung eines gültigen Greifpunktes für ein Objekt o_i wird das Objekt aus dem digitalen Bauraum entfernt und die sortierten Bauteile wieder in definierter Reihenfolge (siehe Kapitel [5.4.2.2](#)) überprüft. Alle erfolgreichen Greifpunkte werden in der abgeleiteten Reihenfolge gespeichert, sodass eine Handhabungsreihenfolge resultiert. Übergeben wird für jeden Greifpunkt ein Tupel $\langle TCP_i, AV_i \rangle$, bestehend aus dem [TCP](#) TCP_i und dem Anfahrvektor AV_i . Diese Werte dienen dem Roboter als Eingangsdaten für die Entnahme der Bauteile aus dem Bauraum. Für die Auf- und Entnahme wird eine Initialposition, direkt über dem Bauraum festgelegt. Diese wird vor und nach der Aufnahme angefahren, sodass eine vollständiger Handhabungsvorgang resultiert.

6. Evaluation

Die Evaluation der entwickelten Modelle und Algorithmen wird sowohl einer virtuellen Produktionsumgebung, als auch in einem selbst entwickelten Demonstrator durchgeführt. Damit die unterschiedlichen Module aus Kapitel [3](#), [4](#) und [5](#) ausgeführt werden können wird ein *Python v. 3.10* basiertes Framework (siehe Kapitel [6.1](#)) entwickelt, in dem die Datenhaltung und der Datenaustausch ausgeführt wird. Die Testszenarien enthalten einzelne und mehrere Objekten (siehe Kapitel [6.2](#)) um Szenarien mit unterschiedlicher Komplexität generieren zu können. Anschließend erfolgt eine Darstellung der identifizierten Handhabungspositionen (siehe Kapitel [6.3](#)) und deren mechanische Bewertung (siehe Kapitel [6.4](#)). Dies dient als Grundlage für die digitalen Testszenarien mit einer Betrachtung der identifizierten Greifpunkte, der Bauteilrekonstruktion und der Kollisionsüberprüfung (siehe Kapitel [6.5](#)). Neben der digitalen Evaluation werden die Testszenarien mit einer regelmäßigen Objektverteilung zusätzlich in einem realen Testbed evaluiert (siehe Kapitel [6.6](#)). Abschließend erfolgt die Diskussion der Ergebnisse und der Vergleich zwischen der digitalen und realen Evaluation (siehe Kapitel [6.7](#)).

6.1. Softwaretechnische Umsetzung

Der Aufbau und die Zusammenführung der einzelnen Softwaremodule (siehe Abb. [6.1](#)) wird in einer *Python*-Umgebung umgesetzt. Der Aufbau des Projektes ist bewusst modular gestaltet, sodass einzelne Komponenten direkt austauschbar und erweiterbar sind. Zusätzlich wird dadurch der Einsatz in anderen additiven Fertigungsverfahren und Anwendungsfällen ermöglicht. Der Datenaustausch wird mittels [ASCII](#)-kodierten Datenformaten umgesetzt, um eine manuelle Inspektion der Daten zu ermöglichen. Überwiegend werden *.txt*- und *.json*-Dateien verwendet, um die generierten Handhabungspositionen abzuspeichern. Ebenfalls werden deshalb die STL-Dateien im [ASCII](#) Format ausgegeben. Im Vergleich zum binären STL-Format benötigt die [ASCII](#)-Kodierung deutlich mehr Speicherplatz, ermöglicht allerdings eine manuelle Inspektion und Nachverfolgung während dem Entwicklungsprozess.

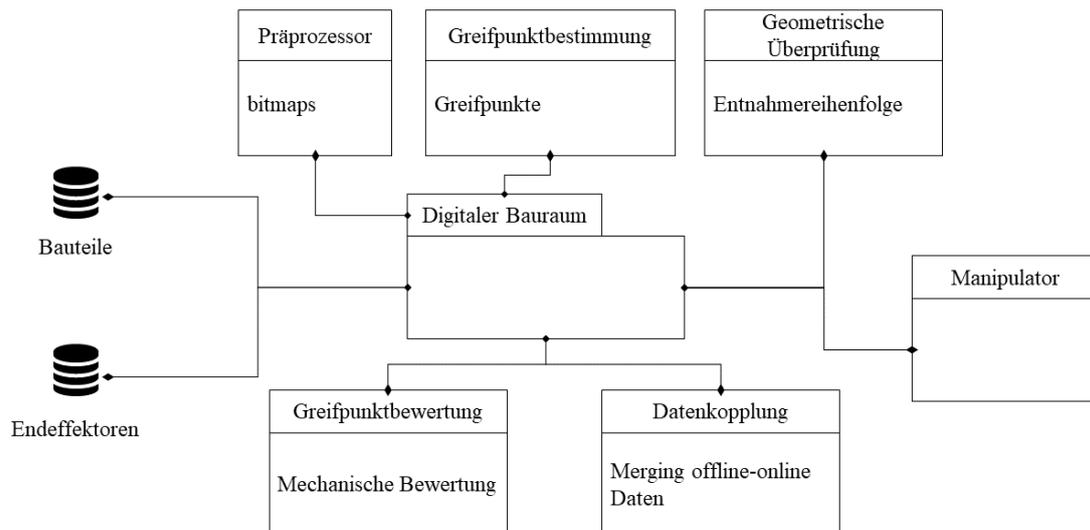


Abbildung 6.1.: Entwickelte Systemarchitektur für die Zusammenführung der einzelnen Module zur automatisierten Bauteilhandhabung.

6.2. Testumgebung

Als Testumgebung wird der Bauraum einer *Desktop-Metal X25Pro* [Desktop-Metal, 2024] mit den Abmaßen $l = 400\text{ mm} \times b = 250\text{ mm} \times h = 250\text{ mm}$ verwendet. Für die Entnahme ist ein Endeffektor (siehe Kapitel 6.2.1) an einem Roboterarm angebracht. In der Testumgebung werden die insgesamt 15 Objekte (siehe Kapitel 6.2.2) in verschiedenen Testszenarien (siehe Kapitel 6.2.3) angeordnet. Zusätzlich werden für die Evaluation die Materialparameter (siehe Kapitel 6.2.4) und das Ausfallkriterium (siehe Kapitel 6.2.5) bestimmt.

6.2.1. Endeffektor

Zur Entnahme wird ein UR5e Roboter mit einem Schunk Co-Act EGP-C-40 Endeffektor verwendet, der einen Arbeitsbereich $d_{min} = 20\text{ mm}, d_{max} = 40\text{ mm}$ (siehe Abb. 6.2) besitzt [SCHUNK, 2024]. Am Parallelbackengreifer sind Greiferfinger mit planaren, hexagonalen Kontaktflächen montiert. Das Setup aus Parallelbackengreifer und planaren Greiferfingern entspricht einer gängigen Konfiguration im industriellen Kontext.



Abbildung 6.2.: Darstellung des Schunk Co-Act EGP-C-40 [SCHUNK, 2024] mit planparallelen Greiferfingern.

6.2.2. Testobjekte

Als Testobjekte werden verschiedene Formen mit unterschiedlicher Komplexität verwendet (siehe Abb. 6.3). In den Testobjekten sind sowohl einfache Volumenkörper (Kugel, Hexaeder, Zylinder) sowie komplexere Gegenstände enthalten. Neben den einfachen Objekten setzen sich die Testobjekte aus dem Fraunhofer IPA bin Picking Datensatz [Kleeberger et al., 2020a], welcher eine Erweiterung des Siléane Datensatzes ist [Brégier et al., 2017], zusammen. Somit enthält der Datensatz sowohl Alltagsobjekte und gängige Maschinenelemente (Wellen, Zahnräder, Muttern, Abstandshülsen). Der Arbeitsbereich des Endeffektors beträgt 20 mm , weshalb die Objekte skaliert werden müssen. Ohne diesen Schritt sind die Abmaße der Objekte zu groß für den eingesetzten Greifer, da dieser speziell für Kleinteile ausgelegt ist.

6.2.3. Testszenarien

Als Testszenarien werden sowohl Bauräume mit nur einem Bauteil als auch mit mehreren evaluiert. Testszenario (TS) mit mehreren Bauteilen enthalten, sowohl eine regelmäßige Anordnung der Bauteile als auch eine zufällige Positionierung und Orientierung. Wie oft dasselbe Bauteil im TS enthalten ist, ist ebenfalls nicht begrenzt. In einem Auftrag kann also das gleiche Bauteil mehrmals enthalten sein. Für die Entnahme wird von einer Transportbox ausgegangen, bei der die Bauteile nur von oben zugänglich sind. Somit resultiert als Sortierreihenfolge (siehe Abb. 5.4) die z -Richtung. Für die Greif-

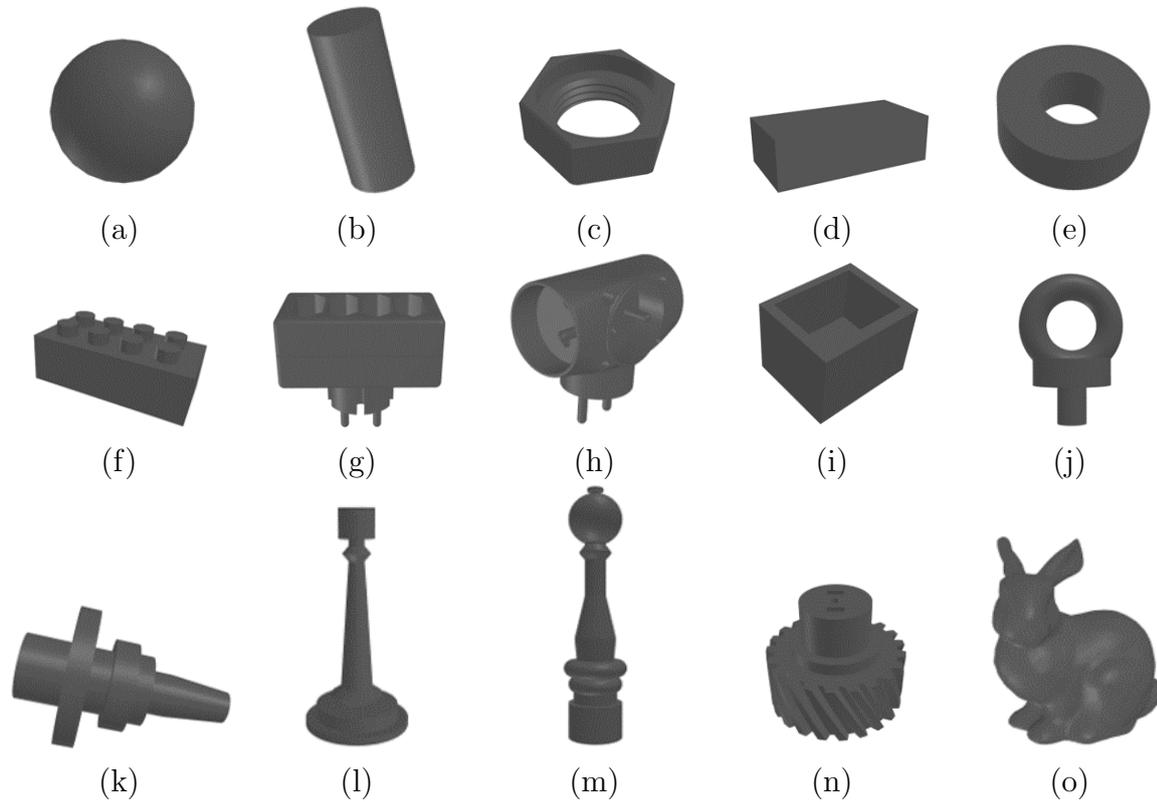


Abbildung 6.3.: Verwendete Bauteile in den Testszenarien. (a) Kugel (b) Zylinder (c) Mutter (d) Hexaeder (e) Kreisring (f) SileaneBrick (g) SileaneTLess22 (h) SileaneTLess20 (i) SileaneTLes29 (j) IPARingScrew (k) IPAGEarShaft (l) SileaneCandleStick (m) SileanePepper (n) SileaneGear (o) SileaneBunny.

punktbestimmung wird das Verfahren zur Bestimmung von Punk- und Linienkontakten verwendet (siehe Kapitel [3.1.2](#)). Zusätzlich zu den Randbedingungen in [5.4.2](#) für die Selektion der Greifpunkte wird aus den Punktclustern (siehe Kapitel [5.2.1](#)) eine weitere Randbedingung für die Positionierung der Objekte im Präprozessor abgeleitet. Ein neues Objektcluster wird nur gebildet, wenn der Abstand zwischen zwei Einträgen größer als r_{min} ist. Daher muss der Abstand zwischen zwei Objekten bei der Positionierung im Präprozessor mindestens r_{min} betragen. Zusätzlich dazu gilt für die Diskretisierung

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z < r_{min}. \quad (6.1)$$

Ist dies nicht der Fall und die Diskretisierung zu groß, kann nicht zwischen den einzelnen Objekten differenziert werden und eine falsche Segmentierung erfolgen.

Insgesamt werden 10 [TS](#) (siehe Tabelle [6.1](#)) mit unterschiedlicher Komplexität betrachtet. In TS1, TS2 und TS3 wird jeweils ein Testobjekt im Bauraum platziert und

entnommen. In TS4, TS5 und TS6 sind mehrere Objekte enthalten, allerdings in einer Ebene angeordnet, wobei in TS4 und TS5 nur ein Bauteil vervielfältigt wird und in TS6 und TS7 verschiedene Bauteile angeordnet sind. In TS8, TS9 und TS10 sind jeweils mehrere unterschiedliche Objekte, in einer zufälligen Anordnung und Positionierung im Bauraum, enthalten. Das komplexeste **TS** liegt in TS10 vor, indem alle 15 Testobjekte zufällig angeordnet sind und ein dicht gepackter Bauraum resultiert.

Tabelle 6.1.: Evaluierete Testszenarien und Anzahl der enthaltenen Objekte.

Testobjekt	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9	TS10
Kugel	1	-	-	-	-	1	-	4	-	1
Zylinder	-	1	-	-	-	1	-	4	-	1
Mutter	-	-	-	-	-	1	-	4	-	1
Hexaeder	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
Kreisring	-	-	-	-	6	1	-	-	-	1
SileaneBrick	-	-	-	3	-	1	-	-	-	1
SileaneTLess22	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
SileaneTLess20	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
SileaneTLess29	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
IPARingScrew	-	-	1	-	-	-	1	-	-	1
IPAGearShaft	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
SileaneCandle-Stick	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
SileanePepper	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
SileaneGear	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
SileaneBunny	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1

6.2.4. Materialparameter

Ohne experimentellen Aufbau müssen die unbekanntenen Materialparameter mit Hilfe analytischer oder numerischer Verfahren bestimmt werden. Eine Möglichkeit mittels der **FEM**, die makroskopischen Materialparameter aus der mikroskopischen Struktur zu bestimmen, stellt das Repräsentatives Volumenelement (**RVE**) dar [Ferretti et al., 2021]. Hierfür ist allerdings eine zusätzliche Modellierung der entstehenden Mikrostruktur mit allen Phasen und Poren notwendig. Aus diesem Grund wird eine literaturbasierte Modellierung des transversal isotropen Materialverhaltens mit einem analytischen Verfahren durchgeführt.

Prädikative Modelle, die exakte makroskopische Materialparameter ausgeben wie bspw. das Mori-Tanaka Modell [Mori et al., 1973] sind eher ungeeignet für die Anwendung

ohne Referenzwerte durch Experimente. Eine zuverlässige Prädiktion der Werte ist bei diesen Modellen nur unter bestimmten Voraussetzungen und in definierten Bereichen möglich. Die Applikation des Mori-Tanaka Modells auf die vorliegende Problemstellung (siehe Kapitel [A.4.3](#)) führt bspw. zu plausiblen Ergebnissen für das Elastizitätsmodul (E_{\parallel}, E_{\perp}) und das Schubmodul (G_{\parallel}, G_{\perp}), jedoch liegt die Querkontraktion ν außerhalb des zu erwartenden Bereichs und wird deutlich zu niedrig bewertet. Da die Partikel einen sehr großen Volumenanteil besitzen und das Verhältnis $\log \frac{G_p}{G_m} = -4.5$ äußerst niedrig ist, ist nach [Christensen et al., [1992](#)] ein Fehler $> 20\%$ zu erwarten. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist es sinnvoller, einen Bereich abzuschätzen, in dem die mechanischen Kennwerte liegen. Hierfür eignet sich das *Reuss-Voigt* Modell [Voigt, [1889](#)]. Mit dem Modell kann eine obere und eine untere Grenze für die mechanischen Kennwerte bestimmt werden. Zusätzlich wird mit dem *Hill Budiansky* Modell [Hill, [1965](#)] [Budiansky, [1983](#)] noch ein weiteres selbstkonsistentes Modell evaluiert.

Der aus zwei Phasen bestehende Verbundwerkstoff, fortan gekennzeichnet mit einem tiefgestellten c , besteht aus einer Matrix (m) und den eingeschlossenen Metallpartikeln (p). Im [B.J](#) wird die Matrixstruktur durch die Aushärtung des Bindemittels gebildet. Ausgangsparameter für die Berechnung bilden die mechanischen Kennwerte (E_m, E_p, ν_m, ν_p) der beiden Phasen (siehe Tabelle [6.2](#)).

Tabelle 6.2.: Materialparameter für das Bindemittel ([PVA](#)) und das Metallpulver (316L) des Grünlings in den Testszenarien.

Komponente	E-Modul [MPa]	ν [-]	Volumenanteil v
PVA 20 wt% [Li et al., 2021]	3.9	0.3	0.3
316L [Carnavas, 1998]	195000	0.29	0.7

Aufgrund des entstehenden Gemenges aus Wasser und [PVA](#) resultiert für das E-Modul ein deutlich geringerer Festigkeitswert als für reines [PVA](#). Das resultierende E-Modul ist dabei signifikant vom Massenanteil (wt%) der enthaltenen Flüssigkeit abhängig und sinkt mit größerem Wasseranteil ab. Für 20 wt% Wassermenge resultiert nach [Li et al., [2021](#)] ein E-Modul $E_m = 3.9 MPa$, was einen Abfall von 96,1 % gegenüber reinem [PVA](#) (100 MPa) entspricht. Für das E-Modul des 316 L Pulvers ergibt sich nach [Carnavas, [1998](#)] ein E-Modul von $E_p = 195000 MPa$.

Damit das Verfahren für die Generierung der transversal isotropen Materialeigenschaften im [B.J](#) eingesetzt werden kann, müssen einige Annahmen getroffen werden:

- Die Verteilung der Partikel in der Matrix ist homogen.
- Partikeleinschlüsse haben eine spherische Geometrie mit einem konstanten Durchmesser.
- Der Verbundwerkstoff besitzt keine Lufteinschlüsse und somit keine Poren.
- Sowohl Matrix als auch Partikel haben ein isotropes Materialverhalten.
- Das Verhältnis zwischen E-Modul $\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}}$ und Schubmodul $\frac{G_{\parallel}}{G_{\perp}}$ ist gleich.

Die Annahme oder Forderung nach dem gleichen Verhältnis zwischen E-Modul und Schubmodul in die jeweiligen isotropen Richtungen des Werkstoffs resultiert aus den experimentellen Werten in [Mariani et al., 2020]. Aus den durchgeführten Zugversuchen stehen nur die longitudinalen E_{\parallel} und transversalen E_{\perp} E-Moduli zur Verfügung und weder Schubmodul noch Querkontraktion. Da nur dieser Wert zur Verfügung steht, wird angenommen, dass sich Schubmodul und E-Modul gleichermaßen verhalten. Basierend auf diesen Annahmen kann das transversal isotrope Materialverhalten im [B.J] gebildet werden. Die resultierenden Materialkennwerte aus den unterschiedlichen Modellen sind in Abb. 6.4 dargestellt. E-Modul und Schubmodul, bestimmt durch das

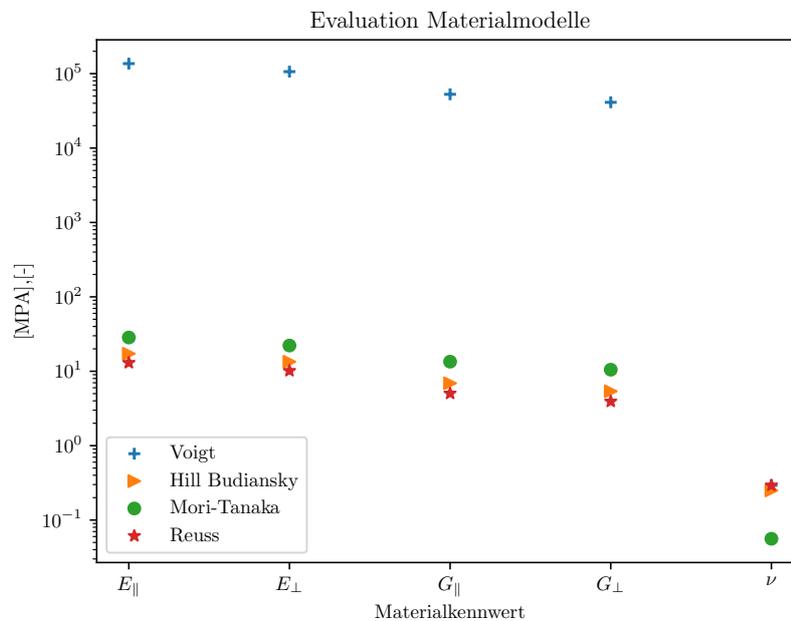


Abbildung 6.4.: Materialkennwerte E_{\parallel} , E_{\perp} , G_{\parallel} , G_{\perp} , ν für den Verbundwerkstoff bestehend aus 316L und [PVA] mit dem Voigt-, Hashin-Shtrikman-, Mori-Tanaka-, Hill Budiansky- und Reuss Modell.

Mori-Tanaka- bzw. *Hill Budianski*-Modell, liegen nahe der unteren Grenze, definiert durch das *Reuss*-Modell. Die untere Grenze wird charakterisiert durch die Materialkennwerte des Matrixwerkstoffes, da dieser eine deutlich geringere Steifigkeit besitzt. Die Querkontraktionen ν_{MT}, ν_{HB} liegen außerhalb der Grenzen definiert durch *Voigt*, *Reuss*. Beide Modelle führen zu einer Unterbewertung der Querkontraktion, wobei mit dem *Mori-Tanaka*-Modell eine äußerst geringe Querkontraktion $\nu_{MT} = 0.056$ resultiert. Bei diesem niedrigen Wert sind im Vergleich zur axialen Dehnung extrem geringe transversale Dehnungen des Materials zu erwarten. Die Querkontraktion $\nu_{HB} = 0.24$ des *Hill Budianski* Modells liegt zwar deutlich näher am unteren Grenzwert, $\nu_{Reuss} = 0.292$ befindet sich trotzdem außerhalb der definierten Grenzen durch die Verbundmaterialien $[0.29, 0.3]$. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wird die untere Grenze (siehe Tabelle 6.3), definiert durch das *Reuss*-Modell für die weitere Berechnung verwendet. Dies stellt zwar eine konservative Bestimmung der Materialparameter dar, ermöglicht aber die sichere Abschätzung der mechanischen Belastung ohne Beschädigungen der gedruckten Teile. Der mit diesen Parametern resultierende Elastizitätstensor C ist in Kapitel A.4.5 abgebildet.

Tabelle 6.3.: Resultierende Materialkennwerte bestimmt mit dem *Reuss* Modell.

E_{\parallel} [MPa]	E_{\perp} [MPa]	G_{\parallel} [MPa]	G_{\perp} [MPa]	ν [-]
13.00	10.14	5.027	3.92	0.292

6.2.5. Ausfallkriterium

Als Ausfallkriterium für den Verbundwerkstoff wird die Streckgrenze R_e des ausgehärteten Bindemittels gewählt. Wird diese Grenze überschritten, tritt eine Beschädigung der Matrix ein und nach der Theorie des schwächsten Gliedes für Verbundwerkstoffe [Huang et al., 2012] resultiert somit ein Werkstoffversagen. Aus [Li et al., 2021] ergibt sich für PVA mit 20 wt % eine Streckgrenze $R_e = 7.55 \text{ MPa}$, die als Ausfallkriterium verwendet wird.

6.3. Handhabungspositionen

Zur Bestimmung der Handhabungspositionen wird für alle Testobjekte das Verfahren zur Bestimmung von Punkt- und Linienkontakten (siehe Kapitel 3.1.2) angewendet. Die daraus resultierenden Greifpunkte sind in Abb. 6.5 dargestellt. Bei näherer Betrachtung

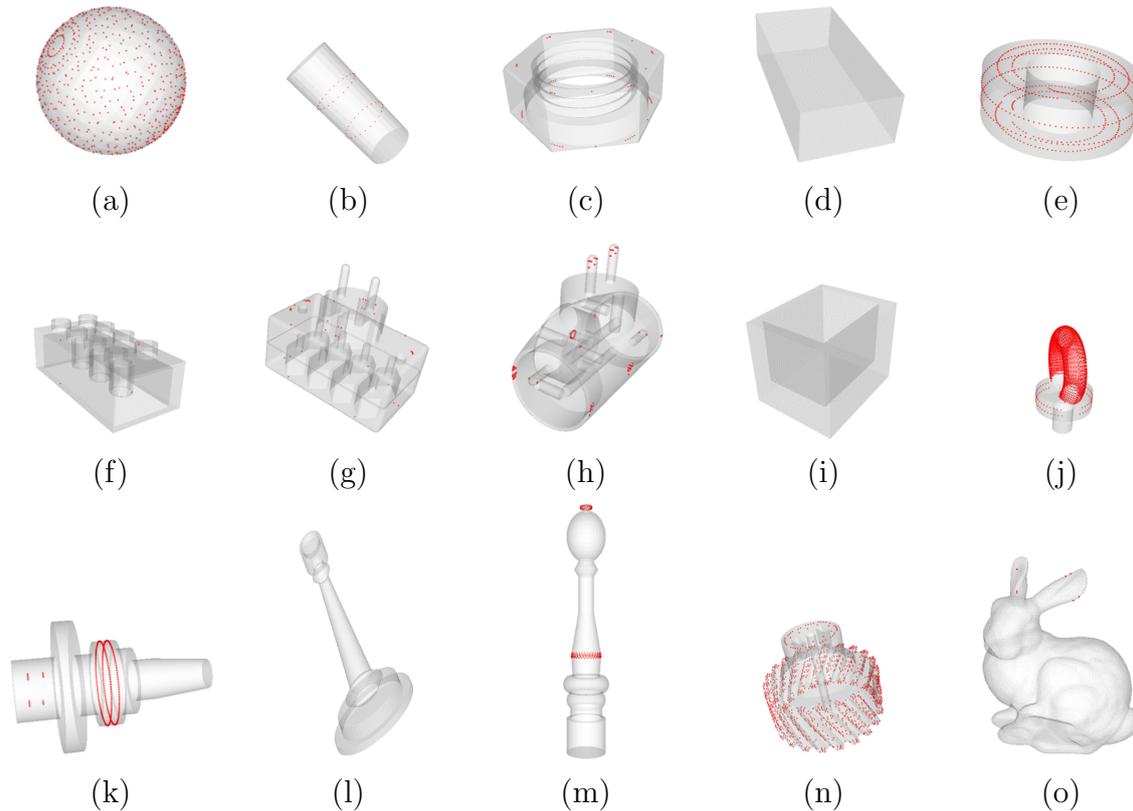


Abbildung 6.5.: Detektierte Handhabungspositionen für die Testobjekte mittels konvexer Hüllen. (a) Kugel (b) Zylinder (c) Mutter (d) Hexaeder (e) Kreisring (f) SileaneBrick (g) SileaneTLess22 (h) SileaneTLess20 (i) SileaneTLess29 (j) IPARingScrew (k) IPAGearShaft (l) SileaneCandleStick (m) SileanePepper (n) SileaneGear (o) SileaneBunny.

der Testobjekte und des Greifers entsteht die Vermutung, dass bei den Testobjekten c , d , f , g und i auch ein flächiger Kontakt (siehe Kapitel [3.1.1](#)) existiert. Da jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt keine automatisierte Selektion der Verfahren implementiert ist, wird aus Effizienzgründen dasselbe Verfahren verwendet.

Zusätzlich sind die Ergebnisse des durchgeführten Algorithmus in Tabelle [6.4](#) dargestellt. Für das zweistufige Verfahren sind neben der Anzahl an Netzelementen sowohl die identifizierten konvexen Punkte, sowie die daraus resultierenden Greifpunkte und die Berechnungszeiten abgebildet.

Alle Testobjekte besitzen die gleichen Tesselierungs-Parameter, wodurch die einfachen Testobjekte mit wenigen Features (a, b, d, e) mit einer geringen Anzahl an Netzelementen resultieren und die komplexeren Objekte (c, g, h, j, o) mehrere tausend Netzelemente besitzen. In einem ersten Durchlauf wurde der Algorithmus ohne Randschichtvernetzer (siehe Kapitel [3.1.2.1](#)) durchgeführt. Abbildung [6.5](#) und Tabelle [6.4](#) zeigen,

Testobjekt	Netzelemente	Konvexe Punkte	Greifpunkte	Konvexe Punkte [s]	Punktpaare [s]	\sum [s]
Kugel	528	528	600	1.33	4.51	5.84
Zylinder	92	92	24	0.19	0.16	0.34
Mutter	4980	1522	57	15.64	42.98	58.63
Hexaeder	12	12	0	0.05	0.02	0.07
Kreisring	696	556	1180	1.67	26.41	28.08
SileaneBrick	523	133	5	1.31	1.70	3.01
SileaneTLess2	46924	2505	38	15.19	128.53	143.72
SileaneTLess2	21124	17004	119	146.58	20562.95	20709.53
SileaneTLess29	28	18	0	0.08	0	0.08
IPARingScrew	4948	4560	7150	15.69	592.44	608.13
IPAGearShaft	4260	2425	488	13.16	122.58	135.73
SileaneCandleStick	1206	535	0	2.86	3.98	6.84
SileaneCandleStick*	3046	2638	340	8.89	185.88	194.77
SileanePepper	3738	2789	102	11.17	166.14	177.31
SileaneGear	4404	1904	1776	14.63	135.45	150.08
SileaneBunny	7000	3451	4	26.53	284.25	310.78

Tabelle 6.4.: Ergebnisse der Greifpunktbestimmung für die 15 Testobjekte. *Randschichtvernetzer

bis auf für die Testobjekte d und i , mit diesem Vorgehen eine ausreichende Menge an Greifpunkten. Außer in den Objekten d , i entstehen mindestens vier Lösungseinträge, meistens enthält der Lösungsraum jedoch mehrere hundert Greifpunkte. Gleichzeitig zeigt die räumliche Positionierung der Greifpunkte eine gleichmäßige Verteilung auf den Objekten, sodass die Zugänglichkeit aus verschiedenen Richtungen gewährleistet ist. Beim *SileneBunny* ergibt sich eine lokale Konzentration der Greifpunkte. Dies ist allerdings auf die Größe des Modells in Kombination mit der geringen Anzahl an Greifpunkten zurückzuführen.

Zwar konnte bei der initialen Anwendung für Objekt l kein Greifpunkt identifiziert werden, jedoch eignet sich die rotationssymmetrische Geometrie, vergleichbar mit den Objekten b, k, m , für die Handhabung mit einem Parallelbackengreifer. Allerdings führt die Positionierung der benachbarten Netzelemente an allen Stellen zu einer negativen Klassifizierung. Wird an diesem Objekt zusätzlich eine Randschichtvernetzung durchgeführt, können 340 Greifpunkte detektiert werden. Gleichzeitig erhöht sich die Anzahl der Netzelemente dabei von 1206 auf 3046.

Für die Objekte d und i konnten auch mit Randschichtvernetzung keine Greifpunkte ermittelt werden. Beide Objekte besitzen zwar viele Konvexe Punkte, in Objekt d entspricht sogar jeder Elementschwerpunkt einem konvexen Punkt, jedoch kann kein gültiges Paar daraus gebildet werden. Die Abmaße beider Objekte liegen im Arbeitsbereich des Greifers, weswegen die Lage der konvexen Punkte genauer betrachtet wird. Bei der Analyse aller identifizierter Punkte in Abb. 6.6 erfüllen die identifizierten konvexen Punktpaare nur eines der beiden Kriterien für einen zulässigen Greifpunkt. Gegenüberliegende Punkte besitzen zwar einen entgegengesetzten Normalenvektor,

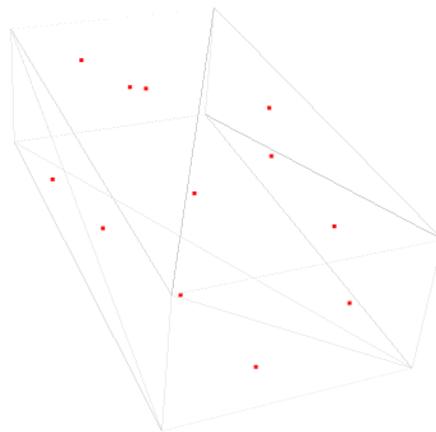


Abbildung 6.6.: Räumliche Positionierung der konvexen Punkte (rot) am Testobjekt Hexaeder.

erfüllen also das Winkelkriterium, liegen aber außerhalb der zulässigen Überlappung α . Zurückzuführen ist dieser Abstand auf die Initialisierung der Punkte auf der Oberfläche des Objektes. Durch die Selektion des Dreiecksschwerpunktes können die Punkte, infolge der Triangulation, außerhalb des Überlappungsbereiches liegen. Für Objekt d weisen vier der sechs Flächen genau eine entgegengesetzte Triangulation auf, sodass in diesem Fall alle möglichen Greifpunkte das Überlappungskriterium nicht erfüllen. Die Triangulation wird eigenständig von der CAD-Software durchgeführt wird. Um die Verbindungen zu parametrisieren ist eine eigenständige Adaption aller Verbindungen notwendig. Für Objekte mit wenigen Elementen ist dies zwar noch möglich, jedoch auf komplexere Bauteile nicht übertragbar. Für die Objekte d und i muss deshalb ein anderes Verfahren zur Greifpunktbestimmung eingesetzt werden.

Aufgrund der Verwendung von planparallelen Kontaktflächen am Endeffektor (siehe Abb. 6.2) in Kombination mit geometrisch einfachen Objekten, kann das Verfahren zur Identifikation formschlüssiger Kontaktpositionen (siehe Kapitel 3.2) eingesetzt werden. Für diese Kombination aus Greifer und Objekten eignet sich auch das Verfahren für ebene Kontaktflächen (siehe Kapitel 3.1.1) allerdings ist dessen Anwendung bereits in [Vogt et al., 2022b] nachgewiesen und wird deshalb nicht für Objekt d und l verwendet. Mit der Anwendung von 3.2 konnten für beide Objekte eine Vielzahl an zulässigen Kontaktpositionen bestimmt werden (siehe Abb. 6.7).

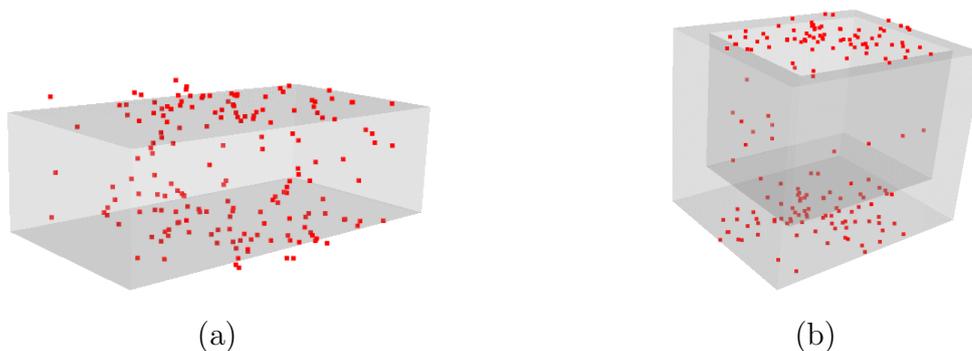


Abbildung 6.7.: Detektierte Kontaktpositionen (rot) für die Objekte (a) Hexaeder und (b) SileaneTLess29 mit Hilfe der formschlüssigen Greifpunktbestimmung.

Für beide Objekte erzeugt der Algorithmus ca. 85 Greifpunkte (siehe Tabelle 6.5). Die Greifpunkte weisen bei beiden Objekten eine homogene Verteilung an den geeigneten Stellen auf der Oberfläche der Testobjekte auf. Dies entsteht durch den stochastischen Ansatz, bei dem zufällige Punkte auf der Oberfläche initialisiert werden und somit

beliebige Punkte, anstatt festgelter Stellen, selektiert werden.

Tabelle 6.5.: Auswertung der formschlüssigen Greifpunktbestimmung für die Testobjekte *Hexaeder* und *Box*.

Testobjekt	Greifpunkte [#]	Gesamtzeit [s]
Hexaeder	88	16.92
Box	87	14.86

6.4. Mechanische Bewertung

Ergebnis der mechanischen Bewertung einer Greifposition ist ein Skalar zwischen 0 und 1, wobei ein niedrigerer Wert einer geringeren Belastung entspricht. Für jede Greifposition wird diese Bewertung mit übergeben und für die weitere Selektion zur Verfügung gestellt. Die Validierung und den Abgleich der entwickelten **FEM** zur Bewertung der mechanischen Belastung wurde mit *Ansys Structural* [Ansys-Mechanical, 2022] durchgeführt. Bei der Evaluation zwischen *Ansys Structural* und dem entwickelten Vorgehen (siehe Kapitel 4) resultierten Abweichungen $< 0.04\%$ zwischen den entstehenden Verschiebungen $u(x) \forall x \in \Omega$. Eine detaillierte Ausführung der Ergebnisse ist in [Vogt et al., 2022a] zu finden.

In diesem Kapitel wird die Evaluation des prozessspezifischen Bauteilmodells (siehe Kapitel 4.1) am Beispiel des Hexaeder vorgenommen und mit der originalen STL-Datei verglichen. Hierfür wird zunächst ein prozessspezifische STL-Datei aus den slicing Daten bestimmt. Die letztendliche programmiertechnische Umsetzung der STL-Rekonstruktion in *vtk* gestaltet sich allerdings umfangreicher als die iterative Anwendung der booleschen Operation (siehe Kapitel 4.1). Die Anwendung des rekursiven Verfahrens führt zu einem sehr hohen Speicherbedarf und skaliert äußerst schlecht für Geometrien mit einigen tausend instanziierten Voxeln. Aus diesem Grund werden zunächst alle Instanzen gleichzeitig erstellt und anschließend die entstehende Außenhülle extrahiert. Durch die einheitliche Diskretisierung und Voxelabmaße in den Daten existiert zwischen zwei benachbarten Voxeln immer eine gemeinsame Fläche mit zwei Dreiecken (siehe Abb. 6.8a). Deshalb werden nach der Instanziierung alle doppelten Elemente bestimmt und entfernt (siehe Abb. 6.8b). Zwischen originaler STL-Datei und der voxelbasierten Rekonstruktion (STL*) resultieren signifikante Unterschiede in den abgespeicherten Daten (siehe Tabelle 6.6). Nicht nur die Anzahl der Netzelemente erhöht

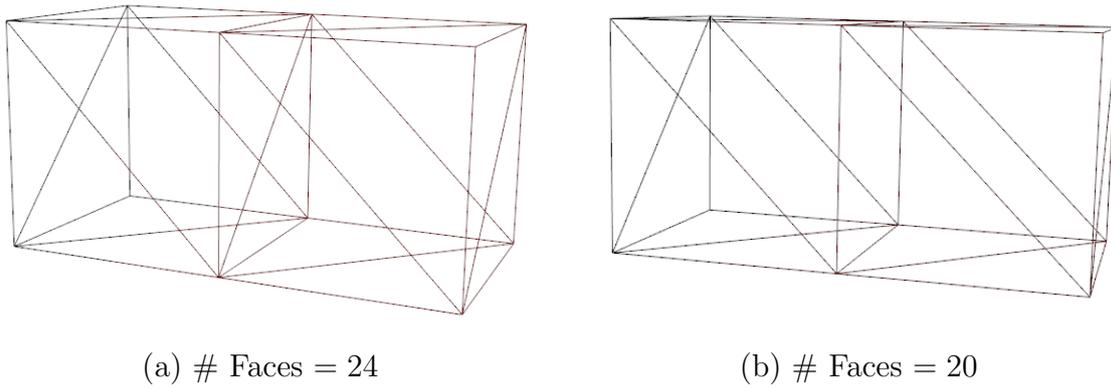


Abbildung 6.8.: Vergleich der Triangulation zweier benachbarter Voxel. (a) Nach der Instanziierung (b) Nach der Extraktion der Oberfläche.

sich signifikant ($12 \mapsto 636328$) sondern auch der dadurch benötigte Speicherbedarf $3.12 MB \mapsto 137.0 MB$. Die geometrischen Unterschiede sind nicht nur anhand der visuellen Inspektion erkenntlich, sondern auch das Volumen der STL-Dateien unterscheidet sich signifikant. Das Verhältnis zwischen voxelbasierter STL-Datei und originaler STL-Datei beträgt ca. 17.1%, somit besitzt das „tatsächlich“ gefertigte Bauteil ein deutlich kleineres Volumen. Nach der Erstellung der prozessspezifischen STL-Datei werden beide Dateien mit der [FEA](#) aus Kapitel [4.5](#) in einem Greifpunkt analysiert. Die Generierung einer gemeinsamen räumlichen Diskretisierung ist nicht möglich, da erhebliche geometrische Unterschiede zwischen beiden Körpern bestehen. Damit die Ergebnisse beider Analysen trotzdem vergleichbar sind, werden die identische Vernetzungsparameter in Form einer gemeinsamen Elementgröße, eingestellt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Netzknoten sowie die Diskretisierung beider Netze nahezu identisch sind und die Ergebnisse vergleichbar sind. Die zulässige Größe eines Elements wird durch die Vernetzung der prozessspezifischen STL-Datei bestimmt und als Parameter für die Vernetzung der originalen STL-Datei verwendet. Für das Testobjekt resultiert als maximales Volumen $V_{el,max} = 0.1 mm^3$ aus dem Netz der voxelbasierten STL-Datei.

Tabelle 6.6.: Vergleich der Metadaten der ursprünglichen STL-Datei mit der prozessspezifischen STL-Datei (STL*).

	STL	STL*
Elemente	12	636328
Speicherplatz	3.12 KB	137.0 MB
$V [mm^3]$	18750.0	3205.86

Berechnet wird bei beiden Modellen die resultierende Verschiebung u (siehe Abb. 6.9). Die Kontaktbereiche in beiden Körpern haben eine ähnliche geometrische Ausprägung, jedoch zeigen die Verschiebungen und Dehnungen deutliche Skalenunterschiede. Die Unterschiede können anhand der maximal detektierten Dehnung verdeutlicht werden (siehe Tabelle 6.7). Mit den gewählten Druckparametern und der eingestellten Füllstruktur resultiert ein dünnwandiger, schalenförmiger CAD-Körper. Im Gegensatz dazu entspricht die ursprüngliche Konstruktion einem vollständig gefüllten Hexaeder. Hierdurch entstehen signifikante geometrische Unterschiede, die in deutlich unterschiedlichen Verschiebungen \vec{u} , Dehnungen $\underline{\epsilon}$ und somit auch Spannungen $\underline{\sigma}$ resultieren. In der Analyse der voxelbasierten STL-Datei ergeben sich Dehnungen, die um den Faktor 10^3 größer sind als mit der originalen STL-Datei (siehe Tabelle 6.7). Aufgrund des Hookeschen Gesetzes und dem linearen Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen resultiert für die Spannungen die gleiche Differenz. Die unterschiedlichen Dehnungen zeigen klar die Notwendigkeit eines prozessspezifischen Bauteilmodells. Ohne dieses resultieren aufgrund der veränderten Geometrie fehlerhafte Ergebnisse und im Fall des BJ werden die Dehnungen und Spannungen zu niedrig bewertet. Somit können trotz einer Analyse der mechanischen Belastung Bauteilbeschädigungen entstehen. An dieser Stelle wird auf eine Einschränkung für die Anwendung der voxelbasierten

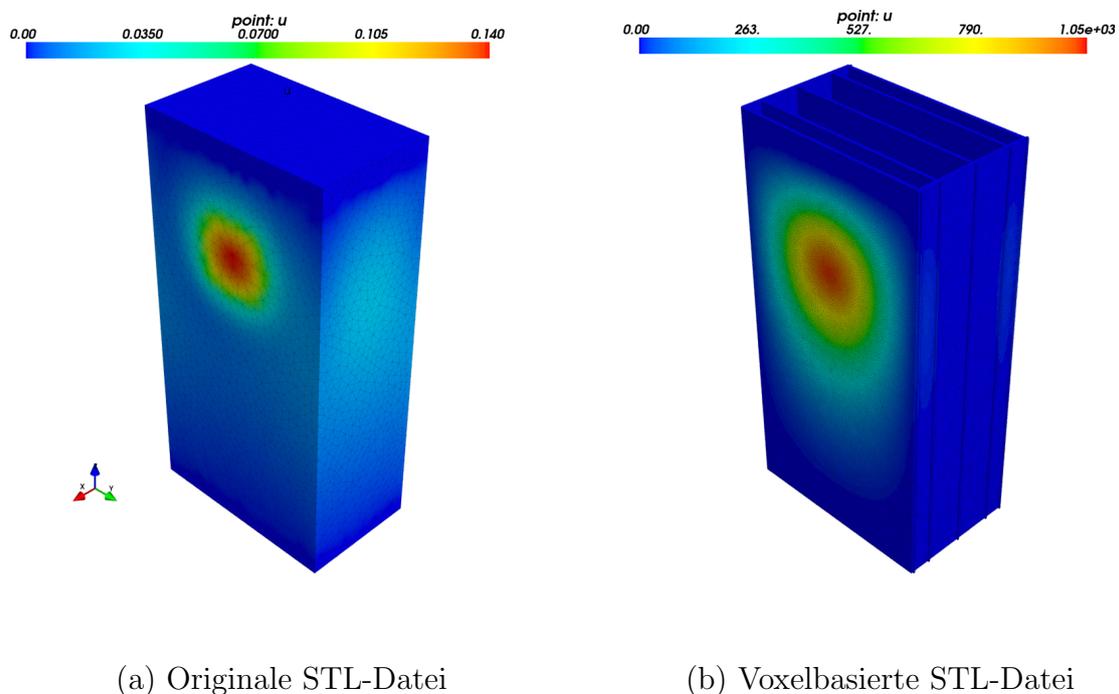


Abbildung 6.9.: Vergleich der resultierenden Verschiebungen u an der originalen STL-Datei (a) und der voxelbasierten STL-Datei (b).

Tabelle 6.7.: Vergleich der berechneten, maximalen Dehnungen ϵ in der originalen STL-Datei und der prozessspezifischen STL-Datei (STL*).

	STL	STL*
$Max \epsilon_{xx}$ [%]	0.00600	11.097
$Max \epsilon_{yy}$ [%]	0.0114	15.613
$Max \epsilon_{zz}$ [%]	0.00899	19.938

STL-Datei näher eingegangen. Notwendig für Generierung eines zulässigen Netzes für die **FEM** ist die Überlappung eines Voxels in den erstellten bitmaps. Damit ein durchgängiges Netz erzeugt werden kann, dürfen die Voxel in bitmap n und in $n+1$ nicht nur eine gemeinsame Kante besitzen, sondern eine gemeinsame Fläche. Andernfalls werden mehrere unterschiedliche Netze erzeugt, die erst noch zusammengefügt werden müssen [Dohrmann et al., 2000]. Diese Einschränkung ist bei den Einstellungen im Präprozessor zu berücksichtigen (Schichthöhe, Diskretisierung). Gefertigte Bauteile besitzen allerdings Wandstärken, die um ein vielfaches größer sind als die Diskretisierung der Pixel, sodass mehrere Pixel zur Abbildung einer Wandstärke benötigt werden und eine Überlappung zwischen den Objekten sichergestellt ist.

6.5. Digitale Evaluation

Bevor die Erprobung am realen Demonstrator erfolgt, werden die **TS** zunächst digital evaluiert. Hierbei wird die digitale Rekonstruktion des Bauraums (siehe Kapitel 6.5.1), die Transformation der Bauteile (siehe Kapitel 6.5.2) und die Bauteilhandhabung (siehe Kapitel 6.5.3) analysiert. Als digitale Testumgebung zur Evaluation wird die Rekonstruktion des Bauraums, der Bauteile, des Roboters und aller weiteren Peripheriegeräte in *vtk* durchgeführt (siehe Abb. 6.10).

6.5.1. Digitale Rekonstruktion der Daten

Für die digitale Rekonstruktion der Daten aus den Bitmaps werden die 10 Testszenarien in drei Kategorien unterteilt. Die Klassifizierung richtet sich nach der Anzahl und Positionierung der Objekte im Bauraum. Eine Gruppe bilden TS1, TS2 und TS3, da in diesen Szenarien jeweils nur ein einzelnes Bauteil enthalten ist. Die Bauteile in TS4, TS5, TS6 und TS7 enthalten eine regelmäßige Anordnung, in der die Bauteile in einer Ebene positioniert sind und werden deshalb zusammen gruppiert. In den verbleibenden

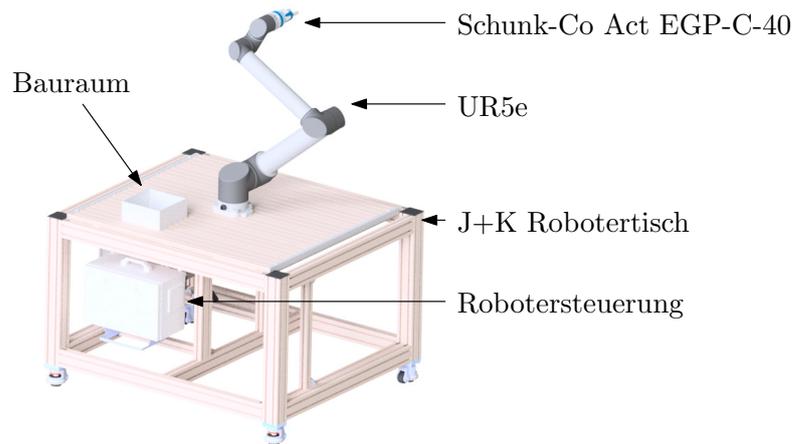


Abbildung 6.10.: Darstellung des digitalen Demonstrators mit dem Roboterarm, Endeffektor und dem Bauraum.

drei Szenarien (TS8, TS9, TS10) sind mehrere Objekte in einer zufälligen Anordnung im gesamten Bauraum positioniert.

6.5.1.1. Einzelne Objekte

Initial wird die Punktwolke P auf 1000 Einträge reduziert, um die Laufzeit des Algorithmus zu verbessern. Die daraus bestimmten Objekte sind in Abb. [6.11](#), [6.12](#), [A.2](#) dargestellt. Auf der linken Seite ist die Grundwahrheit aus dem Präprozessor dargestellt und auf der rechten Seite die jeweilige erzeugte Punktwolke mit der identifizierten und transformierten STL-Datei. Die Rohdaten der Auswertung mit den Transformationsergebnissen sind in [A.5](#) zu finden. In allen [TS](#) konnte die richtige Anzahl an Objekten

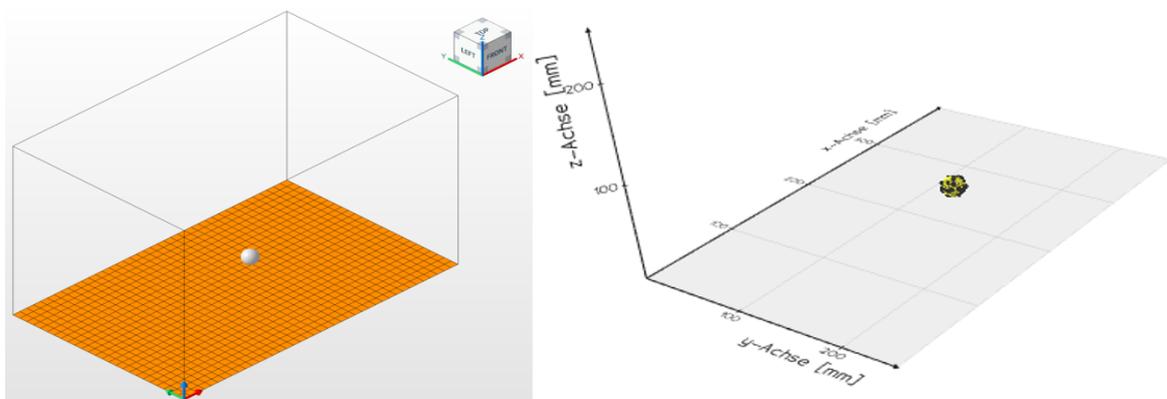


Abbildung 6.11.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS1.

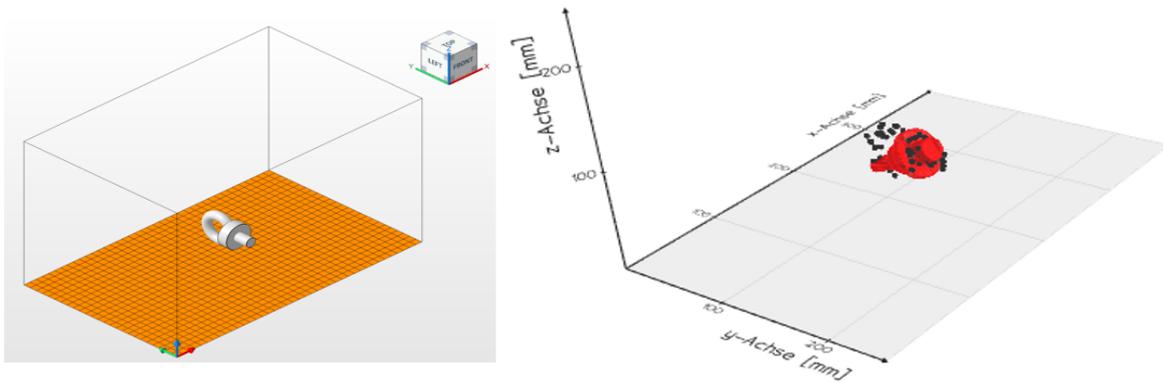


Abbildung 6.12.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS3.

rekonstruiert werden, jedoch nur in TS1 und TS2 wurde dem Punktcluster die richtige STL-Datei zugewiesen. Wird der prozentuale Unterschied zwischen den Volumina aus der konvexen Hüllen des Punktclusters und der STL-Datei betrachtet, zeigt sich für TS1 (siehe Tabelle [A.4](#)) und TS2 (siehe Tabelle [A.5](#)) eine Abweichung von 2.0 % und 5.6 %. Der detektierte Fehler in TS3 (siehe Tabelle [A.6](#)) beträgt 10.4 % jedoch resultiert bei diesem Testszenario nach der Objekttransformation ein **RMSE** von 7.861 mm . Für TS1 und TS2 ist dieser deutlich niedriger (0.0792 mm & 0.0759 mm). Der große Fehler zwischen den konvexen Hüllen nach der Transformation in TS3 lässt darauf schließen, dass entweder eine falsche Transformation vorliegt oder das falsche Objekt detektiert wurde. Mit 1000 Einträgen wird in TS3 die falsche STL-Datei zugewiesen. Anstatt dem tatsächlich vorhandenen *IPARingScrew* wird der *IPAGearShaft* detektiert. Nach einer Erhöhung der Einträge in P auf 10000 Punkte wird in TS3 die richtige STL-Datei detektiert (siehe Abb. [6.13](#)). Für den *IPARingScrew* wird eine Abweichung (siehe

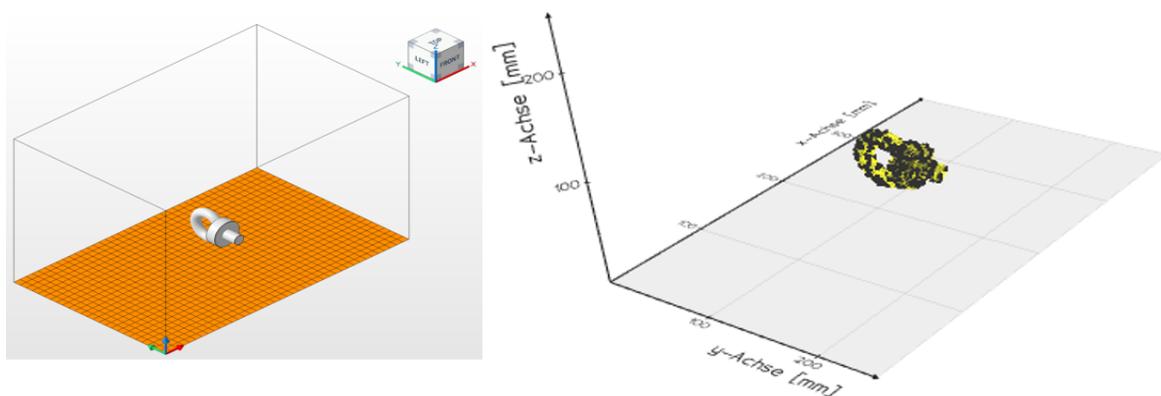


Abbildung 6.13.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling mit $10 \cdot 10^3$ Einträgen in der Punktwolke für TS3.

Tabelle [A.7](#)) des Voluminas von 2.9 % detektiert und nach der Transformation liegt der [RMSE](#) bei 0.0976 mm.

6.5.1.2. Objekte in einer Ebene

In den folgenden Testsets sind mehrere Objekte angeordnet, weshalb die Gesamtanzahl der Einträge in P deutlich erhöht wird. Ansonsten würden Objektcluster mit einer sehr geringen Anzahl an Punkten resultieren und gegebenenfalls die 3D-Geometrie schlecht abbilden. Insbesondere geometrisch kleine Features können unter diesen Voraussetzungen nur sehr schwer abgebildet und rekonstruiert werden.

Bei der Auswertung von TS4, TS5, TS6 und TS7 wird jeweils die richtige Anzahl an Punktclustern detektiert und auch die richtige STL-Datei zugewiesen. In TS4 (siehe Abb. [6.14](#)) werden die STL-Dateien aller sechs Objekte korrekt zugewiesen. Die entstehenden Fehler (siehe Tabelle [A.8](#)) zwischen den Volumina der Punktcluster und der STL-Dateien liegen zwischen 5.1 % und 7.6 %.

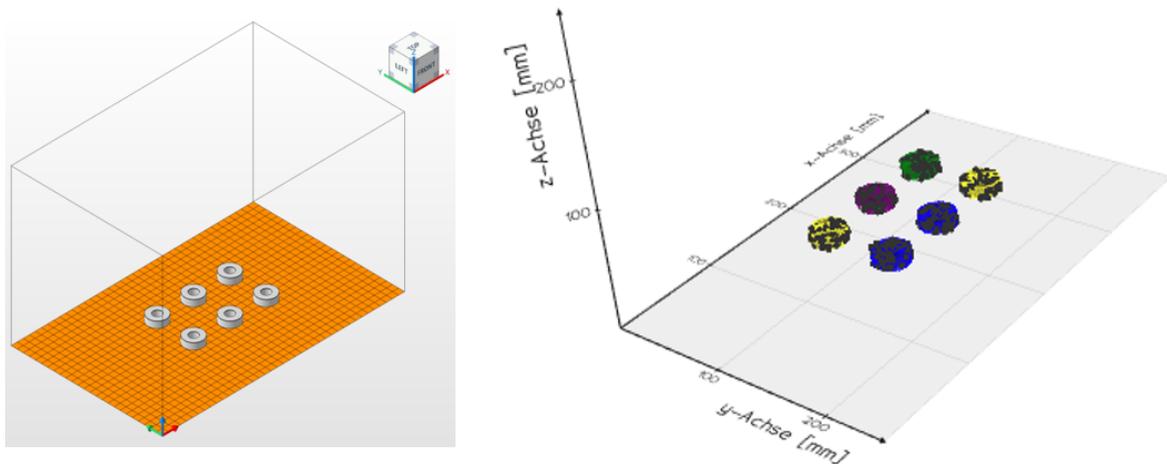


Abbildung 6.14.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS4.

Alle Testobjekte werden in TS5 (siehe Abb. [A.3](#)) mit einer Differenz der Volumina zwischen 17.7 % und 18.8 % (siehe Tabelle [A.9](#)) korrekt zugewiesen.

Für die Volumina der *Kugel*, *Zylinder*, *Mutter*, *Hexaeder* und *Kreisring* liegt der Fehler unter 2.1 % und beim *SileaneBrick* liegt die Abweichung bei 17.4 % in TS6 (siehe Tabelle [A.10](#)). Ähnlich wie in TS5 werden trotz der großen Abweichung für den *SileaneBrick* alle Objekte korrekt klassifiziert (siehe Abb. [A.4](#)).

In TS7 (siehe Tabelle [A.11](#)) ist die Abweichung des *SileaneGear* mit 6.3 % am größten,

alle anderen Punktcluster haben eine Abweichung $< 2.7\%$ und werden richtig zugewiesen (siehe Abb. [A.5](#)).

6.5.1.3. Zufällig positionierte Objekte

Für TS8, TS9 und TS10 werden die gleichen Einstellungen verwendet, wie für TS4-TS7. Die somit erzeugte Anzahl der Punktcluster entspricht in allen [TS](#) dem Soll-Wert. Die Zusammensetzung von TS8 (siehe Abb. [A.6](#)) besteht ausschließlich aus bereits bekannten Objekten, also Bauteilen, die bereits in den vorherigen [TS](#) enthalten sind. Dementsprechend ist die maximale Abweichung der konvexen Hülle mit diesen [TS](#) vergleichbar und liegt bei (2.5 %) (siehe Tabelle [A.12](#)). Ebenfalls vergleichbare Ergebnisse zeigen die Transformationen zu den anderen [TS](#). Trotz der Erhöhung der Bauteile und der dadurch geringeren Anzahl an Punkten pro Objekt zeigen sich in TS8 keine Performance einbußen.

In TS9 (siehe Abb. [A.7](#)) sind rotationssymmetrische Teile mit großen Abmessungen angeordnet. Bei diesen resultiert mit den Einstellungen eine Volumendifferenz von 6.2 % für den *IPAGearShaft*, 0.2 % für den *SileaneCandleStick* und 1.1 % für den *SileanePepper* (siehe Tabelle [A.13](#)).

In TS10 (siehe Abb. [6.15](#)) sind alle Testobjekte in einer willkürlichen Position mit einer zufälligen Orientierung angeordnet. Zwar entspricht die Anzahl der Cluster der Anzahl an tatsächlich vorhandenen Objekten, jedoch werden nur 13 von 15 Objekten richtig detektiert (siehe Tabelle [A.14](#)). Zwei Punktclustern wird eine falsche STL-

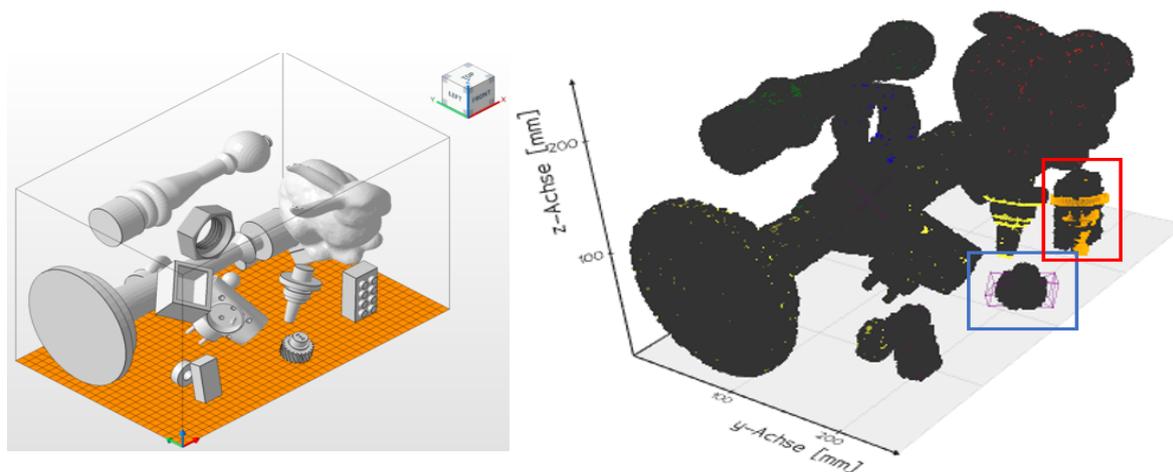


Abbildung 6.15.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS10. Falsch zugewiesene Objekte *SileaneBrick* (rot) und *SileaneGear* (blau) sind farblich markiert.

Datei zugewiesen. In [A.14](#) ist zu erkennen, dass der *SileaneBrick* und *SileaneGear* keine Zuweisung erhalten haben und stattdessen der *Hexaeder* und *IPAGearShaft* zweimal instanziiert wurden. Erkennbar sind die falschen Zuteilungen in Abb. [6.15](#), im rechten unteren Quadranten, anhand der rot und blau markierten Hüllkörper. Neben der visuellen Überprüfung ist die falsche Instanziierung an dem vergrößerten Fehler für das Volumen ($1.7\% < 3.0\%$ und $4.6\% \ll 12.0\%$) und dem [RMSE](#) (10.0 mm und 3.4 mm) für die Rotationen zu erkennen. Bei näherer Betrachtung der erzeugten Referenz Volumina (siehe [A.3](#)) zeigt sich der Grund für die falsche Detektion. Das Volumen des *Hexaeder* (18750 mm^3) hat nur eine geringe Differenz zum Volumen des *SileaneGear* (20442 mm^3). In TS10 beträgt das Volumen der erzeugten konvexen Hülle aus dem Punktcluster 19340 mm^3 und hat somit eine geringere Abweichung zum *Hexaeder* (3.1%) als zum *SileaneGear* (5.4%) und wird deshalb dem falschen Objekt zugeordnet. Zwischen dem *SileaneBrick* (41158 mm^3) und dem *IPAGearShaft* (55498 mm^3) liegt eine größere Differenz, jedoch besitzt das Volumen der konvexen Hülle für den *SileaneBrick* eine größere Abweichung zur STL-Datei. Mit den gewählten Einstellungen beträgt dieses 48826 mm^3 und wird deshalb als *IPAGearShaft* (12.0%) anstatt dem *SileaneBrick* (18.6%) klassifiziert. Die hohe Abweichung des Volumens ist auf die Anzahl der Einträge in P und somit P_i zurückzuführen. Da nach dem Einlesen ein Downsampling durchgeführt wird um die Effizienz zu steigern, bildet das Punktcluster nur eine Näherung der STL-Datei. In TS10 resultiert, aufgrund der Vielzahl an Objekten, mit den getätigten Einstellungen eine deutlich geringere Anzahl an Einträgen für P_i im Vergleich zu den anderen Testszzenarien. Individuelle Tests für den *SileaneBrick* und *SileaneGear*, sowie TS4 und TS7 zeigten bei einer Vergrößerung von P_i eine deutlich bessere Approximation der Oberfläche und somit auch einen geringeren Fehler für das Volumen V_i . Wird die Anzahl der Einträge erhöht können dem *SileaneBrick* und *SileaneGear* die korrekte STL-Datei zugewiesen werden. Die Evaluation von TS10 mit einer geeigneten Anzahl an Punkten war allerdings mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen (16 GB RAM) nicht möglich.

6.5.2. Transformation der Bauteile

In den [TS](#) zeigte sich eine ungenügende Transformationsgüte mit dem [ICP](#)-Algorithmus. Hierdurch entstanden fehlerhafte Positionierungen und Orientierungen der Bauteile. Nur für einen Teil der Objekte führte der Algorithmus zu einer korrekten Transformation. Für die restlichen Bauteile war die Ergebnissgüte nicht ausreichend hoch, um zuverlässig

die richtige Objekttransformation zu berechnen und eine stabile Rekonstruktion der Szene zu ermöglichen. Auch die empfohlenen Adaptionen des **ICP**-Algorithmus [Rusinkiewicz et al., 2001] wie bspw. die Erhöhung der Iterationen, die Ausrichtung der Schwerpunkte oder eine Anpassung sowie das Angleichen der Menge an Eckpunkten, führten zu keiner Ergebnisverbesserung. Aufgrund der schlechten Ergebnisgüte wurde ein alternativer Ansatz für die Transformation verwendet. Da bereits in Kapitel 3.2.3 eine Adaption eines stochastischen Ansatzes zur Identifikation von partiellen Überlappungen implementiert ist, wird dieses Vorgehen nun auch zur Bestimmung der Objekttransformation eingesetzt. Im weiteren Verlauf wird dieses Verfahren **PF** genannt. Im Gegensatz zur Identifikation der formschlüssigen Kontaktstellen, bei der die Normalenvektoren komplementär ausgerichtet sein müssen, ist bei der Objekttransformation das Winkeläquivalent notwendig um die geeigneten Stellen am Objekt zu identifizieren. Das so zur Verfügung stehende, featurebasierte Verfahren zeigte, bei einigen Objekten deutlich bessere Objekttransformationen als der **ICP**-Algorithmus, führte jedoch ebenfalls nicht bei allen Objekten zu einem anwendungstauglichen Ergebnis. Da mit keinem Verfahren alleine eine zuverlässige Lösung generiert werden konnte, wird ein hybrider Ansatz aus beiden Verfahren (**PF+ICP**) als dritte Option evaluiert. In Abb. 6.16 sind alle drei Verfahren für die Transformation des *SileaneTLess20* dargestellt. Die Anwendung des **ICP**-Algorithmus führt zu einem $RMSE = 4.319\text{ mm}$. Der große Fehler ist auch visuell erkennbar. Das transformierte Bauteil ist ca. 100° , im Gegensatz zur tatsächlichen Orientierung, um die z -Achse verdreht. Hier endet der **ICP**-Algorithmus in einem lokalen Minimum. Der **PF** und die Kombination beider Verfahren **PF+ICP**

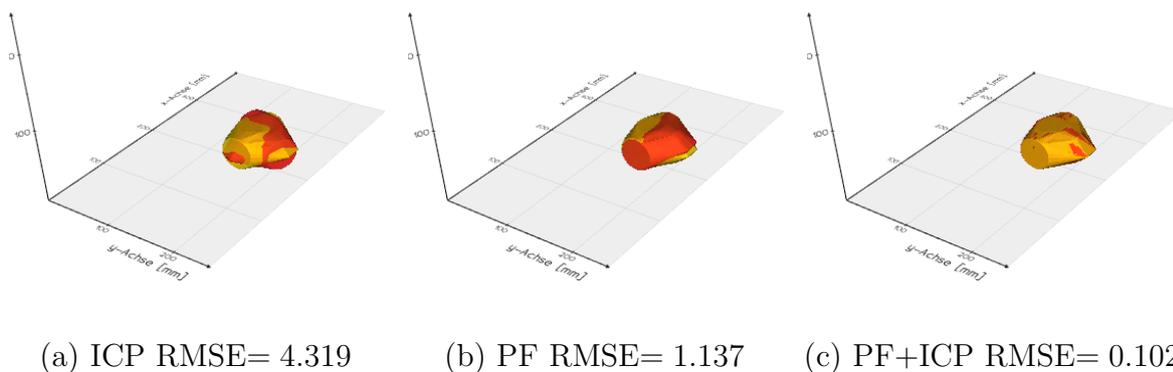


Abbildung 6.16.: Vergleich der berechneten Transformationen für das Testobjekt *SileaneTLess20*. (a) **ICP**-Algorithmus (b) Dem partiellen Formabgleich (**PF**) (c) Einer Kombination aus beiden Verfahren (**PF+ICP**).

führen zu deutlich besseren Transformationen, wobei Letzteres zur besten Ergebnisgüte führt. Das zweistufige Verfahren **PF+ICP** ist vergleichbar mit einem **ICP**, bei dem nicht nur die Schwerpunkte initial ausgerichtet werden, sondern die initiale Transformation des gesamten Objektes eine deutlich bessere Näherung der finalen Transformation darstellen. Für eine detaillierte Analyse werden für alle Transformationen die drei Verfahren eingesetzt. Die letztendlich ausgeführte Transformation entspricht dem Verfahren mit dem geringsten **RMSE**, also der besten Transformation, die aus den drei Verfahren resultiert. Über alle **TS** zeigte die Kombination aus partiellen Formabgleich und **ICP**-Algorithmus die besten Transformationen (siehe Abb. **6.17**).

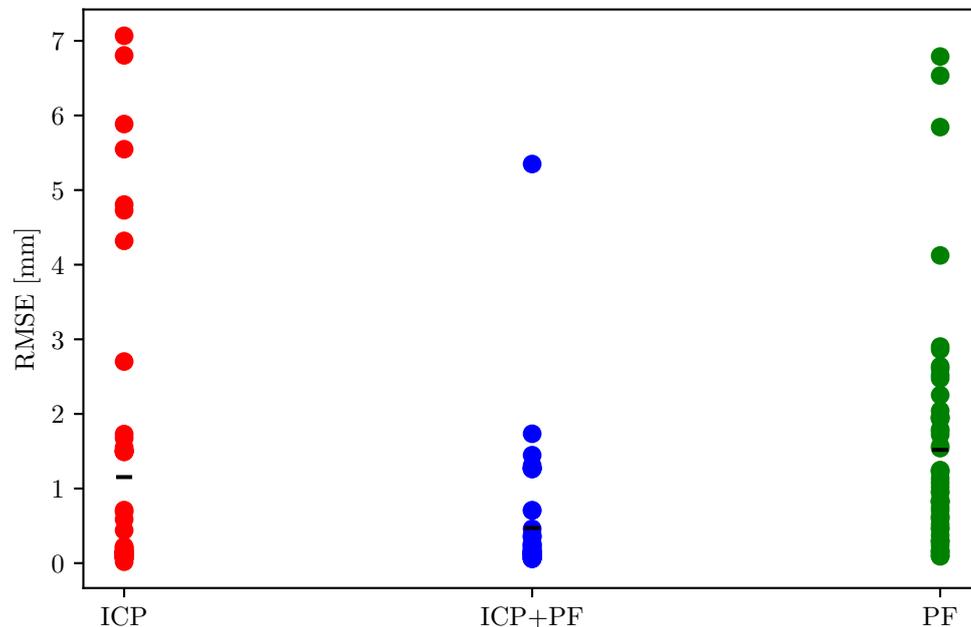


Abbildung 6.17.: **RMSE** für die berechneten Transformationen der Bauteildaten für den **ICP**, **PF+ICP** und **PF**-Algorithmus.

6.5.3. Entnahmereihenfolge

Anhand der rekonstruierten Szenen und dem formulierten Regelwerk (siehe Kapitel **5.4.2**) wird die Entnahmereihenfolge der Objekte bestimmt. Die Ergebnisse aller Test-szenarien sind in Tabelle **6.8** dargestellt.

Bis auf in TS7 konnten alle Objekte unter Berücksichtigung der Randbedingungen

Tabelle 6.8.: Auswertung der geometrischen Überprüfung zur Bestimmung einer Entnahmereihenfolge in den digitalen Testszenarien.

	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9	TS10
Erfolgsquote [%]	100	100	100	100	100	100	83.3	100	100	86.7
Rotationen	1/1	1/1	1/1	3/3	6/6	6/6	5/6	12/12	3/3	13/15
Rechenzeit [s]	243	5	5	45	50	158	542	6585	68	31912

entnommen werden. In TS7 konnte ein Objekt (*SileaneBunny*) nicht aus dem Bauraum entfernt werden (siehe Abb. 6.18), da keine geeignete Handhabungsposition existiert. Die fehlgeschlagene Handhabung des *SileaneBunny* in TS7 ist auf die gesetzten Randbedingungen zurückzuführen. Durch die Positionierung des Bauteils im Bauraum liegen die Kontaktstellen so, dass bei der geometrischen Überprüfung für die Entnahme, Kollisionen auftreten und somit keine gültige Handhabungsposition zur Verfügung steht. Das die Entnahme des *SileaneBunny* mit den identifizierten Handhabungspositionen möglich ist zeigt TS10 (siehe Abb. 6.19). Hier kann der *SileaneBunny* mit

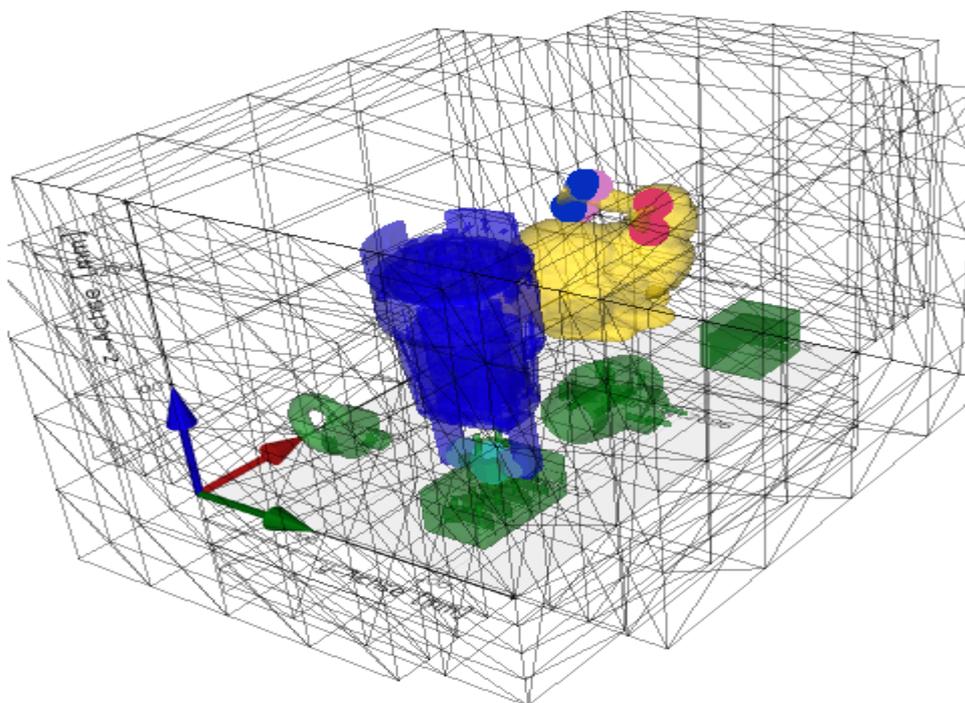


Abbildung 6.18.: Fehlgeschlagene Handhabungspositionen für den SileaneBunny in TS7.

den identifizierten Handhabungspositionen kollisionsfrei entnommen werden. Werden alle Testszenarien betrachtet, werden 53/54 Objekten erfolgreich entnommen. Somit resultiert eine Erfolgsquote von ca. 98.1%. Trotz der falschen Zuweisungen in TS10 wird bei deren Entnahme keine Randbedingung verletzt und resultiert in einer kollisionsfreien Entnahme. Zu erklären ist dies anhand der Datengrundlage. Die Evaluation der Greifpunkte basiert nicht auf der ursprünglichen Punktwolke, sondern auf Basis der transformierten STL-Datei. Nach einer falschen Zuweisung kann deshalb trotzdem eine erfolgreiche Handhabung resultieren. Ohne diese beiden Objekte werden 51/54 Objekten richtig transformiert und entnommen. Somit ergibt sich eine Erfolgsquote für das Gesamtsystem aus Objektidentifikation, Transformation und Bauteilentnahme von ca. 94.4%.

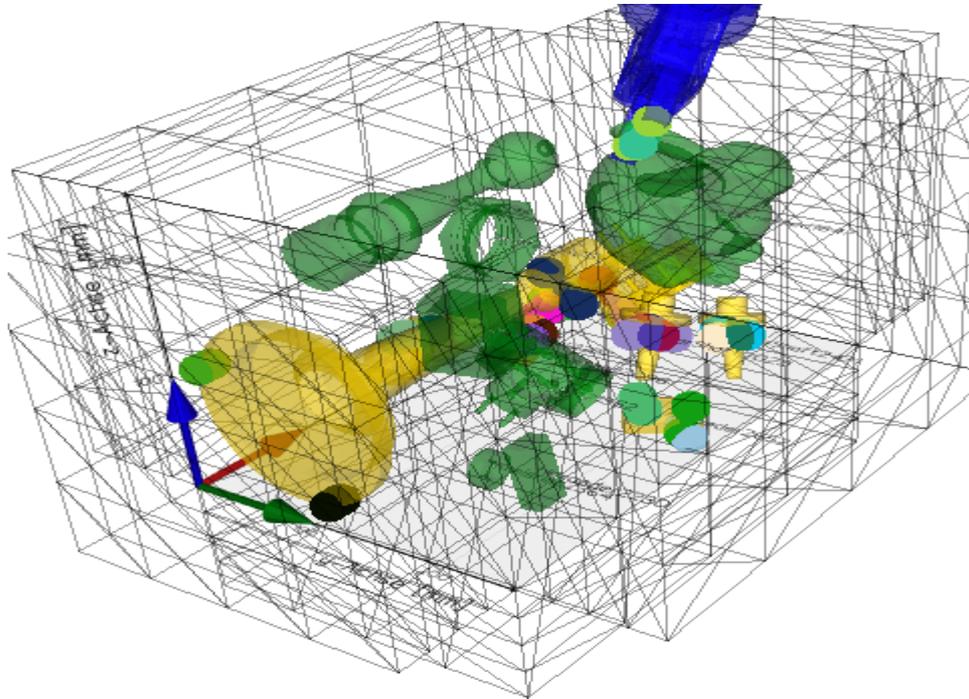


Abbildung 6.19.: Erfolgreiche Handhabungsposition für den SileaneBunny in TS10.

6.6. Sim to Real Validierung

Zusätzlich zur digitalen Validierung der entwickelten Algorithmen und Methoden werden TS1-TS7 in einem realen Testbed evaluiert. Diese Testszenarien enthalten eine regelmäßige Anordnung der Testobjekte und können im Labor rekonstruiert werden. Die räumliche Anordnung der Objekte in TS8, TS9 und TS10 ist zu komplex, um

sie im Testbed (siehe Kapitel [6.6.1](#)) rekonstruieren zu können. Nach dem Aufbau der Testumgebung wird die Datentransformation, zwischen dem digitalen Bauraum und dem realen Testbed beschrieben (siehe Kapitel [6.6.2](#)). Anschließend erfolgt die Betrachtung der Ergebnisse für die realen [TS](#) (siehe Kapitel [6.6.3](#)).

6.6.1. Reales Testbed

Zur Beschreibung des realen Testbeds wird neben den verwendeten Eingangsdaten (siehe Kapitel [6.6.1.1](#)) ebenfalls auf die einzelnen Gerätschaften und Bestandteile des Demonstrators eingegangen (siehe Kapitel [6.6.1.2](#)).

6.6.1.1. Eingangsdaten

Zur Sicherstellung einer Vergleichbarkeit zwischen der realen und digitalen Evaluation, sind die Eingangsdaten beider Tests identisch. Dies bedeutet, dass sowohl die Objekte (siehe Abb. [6.3](#)), Greifpositionen (siehe Abb. [6.5](#)), bitmaps als auch die einstellbaren Parameter aus der digitalen Evaluation für den realen Demonstrator übernommen werden.

6.6.1.2. Aufbau des Demonstrators

Als Testbed wird eine vereinfachte Konfiguration verwendet, in der die Bauteilentnahme aus dem Pulverbett evaluiert werden kann. Eine Darstellung des realen Demonstrators zusammen mit seinem digitalen Abbild und den einzelnen Komponenten ist in Abb. [6.20](#) gegeben. Für die Evaluation werden die Testzenarien rekonstruiert und die Bauteile im Druckbehälter positioniert und im Pulver eingebettet. Anschließend werden vom Roboter alle Bauteile nach der abgeleiteten Handhabungsreihenfolge entfernt. Für die Entnahme der Bauteile wird der UR5e, ein 6-achsiger kollaborativer¹ mit einer Traglast von max. 5 kg verwendet. Als Endeffektor ist der Schunk Co-Act EGP-C-40 (siehe Kapitel [6.2](#)) mit Parallelbackengreifern angebracht.

Die Abmaße des Druckbehälters entsprechen den Abmaßen der [BJ](#)-Anlage $l = 400 \text{ mm} \times b = 250 \text{ mm} \times h = 250 \text{ mm}$. Aus Sicherheitsgründen wird kein Metallpulver verwendet sondern handelsüblicher Fugensand. Dieser besitzt aufgrund seiner Beschaffenheit, bei Raumtemperatur, ähnliche rheologische Eigenschaften wie das Metallpulver. Der

¹Mensch und Roboter haben einen gemeinsamen Arbeitsraum und arbeiten gleichzeitig am selben Bauteil [Buxbaum, [2020](#)].

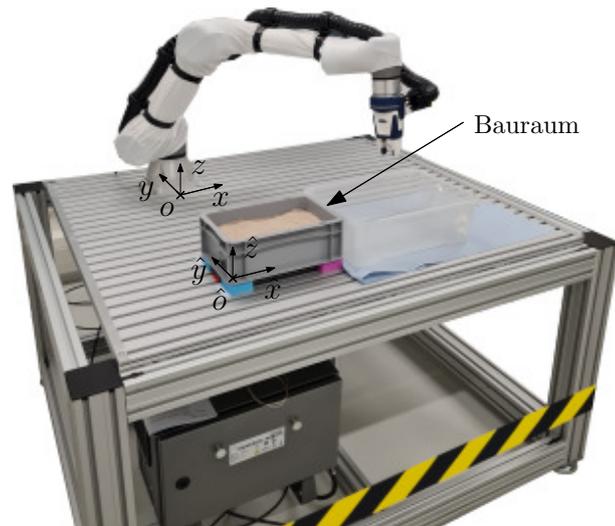


Abbildung 6.20.: Setup des Demonstrators mit den individuellen Bestandteilen.

Pulverersatz hat aber Vorteile in der Materialhandhabung und bietet weniger Gefahrenpotential. Im Gegensatz zum Metallpulver müssen deutlich weniger Schutzmaßnahmen für das Bedienpersonal, sowie den Roboter und Endeffektor getroffen werden.

Für die Positionierung der Bauteile im Druckbehälter wird eine Positionierhilfe mit Abstandshaltern (siehe Abb. 6.21) verwendet. Im Druckbehälter ist am Boden eine Lochplatte eingelegt, in der die Abstandshalter eingesteckt werden können. Als Abstandshalter werden aus Polyactide (PLA) gedruckte Zylinderstifte mit unterschiedlichen Längen verwendet. Hierdurch lassen sich die Werkstücke positionieren, sodass die Lage aus den bitmaps repliziert werden kann.

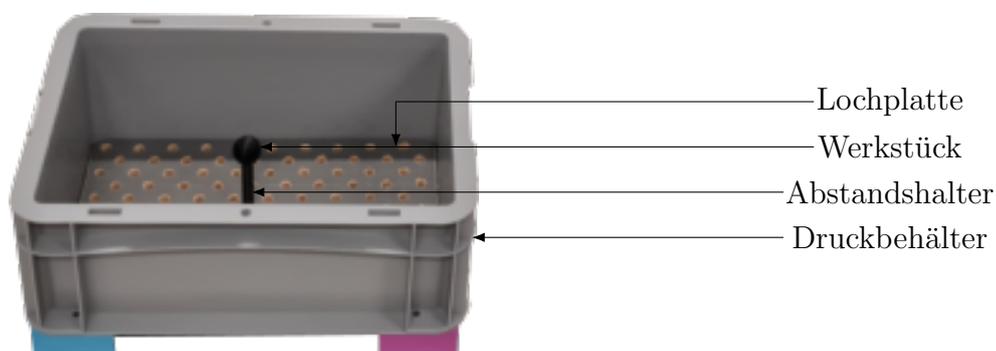


Abbildung 6.21.: Aufbau des Druckbehälters zur Rekonstruktion der Testszenarien. Dargestellt ist die Positionierung des Bauteils von TS1.

6.6.2. Transformation der Greifpunkte

Für die Bahnplanung des Roboters müssen die bestimmten Greifpositionen transformiert werden und dem Roboter in geeigneter Darstellung übergeben werden. Jeder ausgegebene Greifpunkt aus Kapitel 5 enthält die Koordinaten des **TCP** und die Pose des Endeffektors \vec{o} (siehe Abb. 6.22).

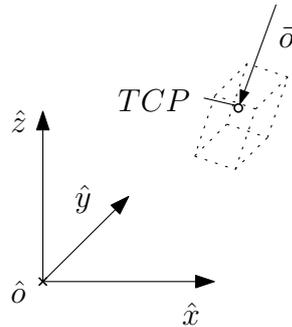


Abbildung 6.22.: Repräsentation eines Greifpunktes durch den **TCP** und Orientierung \vec{o} des Endeffektors.

Ausgehend von der Repräsentation der Greifpunkte p müssen die Greifpunkte zunächst in das Roboter-Koordinatensystem, aus dem körperfesten Koordinatensystem des Bau- raums, transformiert werden (siehe Kapitel 6.6.2.1). Ebenfalls wird eine Repräsentation der Endeffektor Pose in axis-angle Darstellung benötigt (siehe Kapitel 6.6.2.2)

$$p(TCP_x, TCP_y, TCP_z, o_x, o_y, o_z) \rightarrow p(TCP_x, TCP_y, TCP_z, R_x, R_y, R_z). \quad (6.2)$$

6.6.2.1. Koordinatentransformation

Wie in Abb. 6.20 zu erkennen ist, existieren im Demonstrator zwei Koordinatensysteme. Zur Steuerung des Roboters wird das ruhende, kartesische Roboter-Koordinatensystem ($o - R^x, R^y, R^z$) verwendet, dessen Basis sich am Sockel des Roboters befindet. Allerdings erfolgt die Rekonstruktion der Daten aus dem Präprozessor in einem körperfesten Koordinatensystem ($\hat{o} - K^{\hat{x}}, K^{\hat{y}}, K^{\hat{z}}$). Das körperfeste-Koordinatensystem liegt auf dem Druckbehälter, weshalb alle bestimmten Greifpunkte und Posen \vec{o} in diesem Koordinatensystem ausgegeben werden. Für die Steuerung des Roboters müssen diese Koordinaten in das R -Koordinatensystem transformiert werden. Durch die Positionierung des Druckbehälters zeigen die Koordinatenachsen beider Basen in die selben Richtungen, weshalb für die Koordinatentransformation eine rein translatorische Verschiebung durchgeführt werden muss. Ist dies nicht der Fall, muss zusätzlich die

Rotationsmatrix R_{RK} berücksichtigt werden. Der Verschiebungsvektor \vec{d}_{RK} kann mit dem Ursprung beider Koordinatensysteme berechnet werden

$$\vec{d}_{RK} = \begin{pmatrix} \bar{o}_x \\ \bar{o}_y \\ \bar{o}_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{pmatrix}. \quad (6.3)$$

Somit erfolgt die Repräsentation der Koordinaten im Roboter-Koordinatensystem

$$\vec{r}_{oP} = \vec{r}_{\hat{o}P} + \vec{d}_{RK}, \forall P \in GP. \quad (6.4)$$

6.6.2.2. Axis-Angle Darstellung

Zwischen dem Koordinatensystem des Roboters ($o - R^x, R^y, R^z$) und dem körperfesten Koordinatensystem des Bauraums ($\hat{o} - K^{\hat{x}}, K^{\hat{y}}, K^{\hat{z}}$) existiert eine rein translatorische Verschiebung. Die Achsen beider Koordinatensysteme zeigen in die gleiche Richtung. Somit kann, der für eine Greifposition bestimmte **TCP**, mit der Translation \vec{d}_{RK} nach [6.4](#) berechnet werden. Zusätzlich wird ein Greifpunkt durch die Orientierung \vec{o} definiert (siehe Abb. [6.22](#)). Diese kann dem Roboter allerdings nicht in kartesischen Koordinaten übergeben werden. Die Pose des Endeffektors muss dem Roboter in axis-angle Darstellung übergeben werden. Die axis-angle Darstellung setzt sich aus der Rotationsachse \vec{e} und dem Rotationswinkel θ (siehe Abb. [6.23](#)) zusammen.

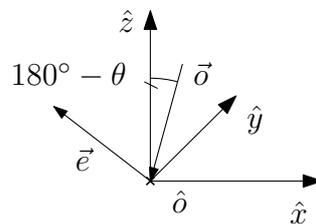


Abbildung 6.23.: Komponenten der axis-angle Darstellung. \vec{e} : Rotationsachse, θ : Rotationswinkel.

Die Rotationsachse \vec{e} wird aus dem Kreuzprodukt der Orientierung \vec{o} und der z -Achse $\vec{K}_{\hat{z}}$ gebildet

$$\vec{e} = \vec{K}_{\hat{z}} \times \vec{o}. \quad (6.5)$$

Mit dem Roationswinkel θ ergibt sich daraus der Rotationsvektor \vec{R}

$$\vec{R} = \theta \cdot \frac{\vec{e}}{\|\vec{e}\|}. \quad (6.6)$$

Durch die Normierung der Rotationsachse \vec{e} wird die Länge des Vektors durch den Rotationswinkel θ beschrieben.

6.6.3. Ergebnisse

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den realen Testszenarien ist in Tabelle [6.9](#) gegeben.

Tabelle 6.9.: Auswertung der geometrischen Überprüfung zur Bestimmung einer Entnahmereihenfolge in den realen Testszenarien.

	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7
Erfolgsquote [%]	100	100	100	100	83.3	83.3	0.0
	1/1	1/1	1/1	3/3	5/6	5/6	0/6

Von den insgesamt möglichen 24 Handhabungsvorgängen werden 15 erfolgreich ausgeführt. Somit resultiert für die real evaluierten [TS1-TS7](#) eine Erfolgsquote von 62.5%. Mit Blick auf die einzelnen Testszenarien ergibt sich für die drei [TS](#) mit einem Objekt ([TS1-3](#)) eine 100% Erfolgsquote. In diesen Szenarien wird das enthaltene Objekt erfolgreich gegriffen und aus dem Pulverbett entnommen.

In TS4 werden die drei Bauteile (*SileaneBrick*) erfolgreich gegriffen und aus dem Pulverbett entfernt. In TS5 werden 5/6 Bauteilen erfolgreich gegriffen und 1 Bauteil verbleibt im Bauraum. Zurückzuführen ist der fehlgeschlagene Griff auf eine schlechte Positionierung des Bauteils bei der Rekonstruktion des Bauraums. Durch die Herstellung der Positionierhilfen im [MEX](#)-Verfahren besitzen die Stützen keine passgenau gefertigten Enden. Aus diesem Grund können sowohl in x , als auch in y -Richtung Abweichungen in der Positionierung entstehen (siehe Abb. [6.24](#)). Die Abweichungen sind abhängig von der Länge der Positionierhilfe, sowie dem Winkel $\frac{\beta}{2}$, welcher die Auslenkung des Zylinderstifts beschreibt. In TS6 werden ebenfalls 5/6 Bauteilen erfolgreich gegriffen und ein Bauteil verbleibt im Bauraum. Der fehlgeschlagene Griff entsteht bei der Handhabung der *Mutter*. Hier tritt, vor dem Erreichen der Greifposition, eine Kollision mit dem Bauteil auf. Während der Anfahrt des Endeffektors wird eine kontinuierliche Rotation

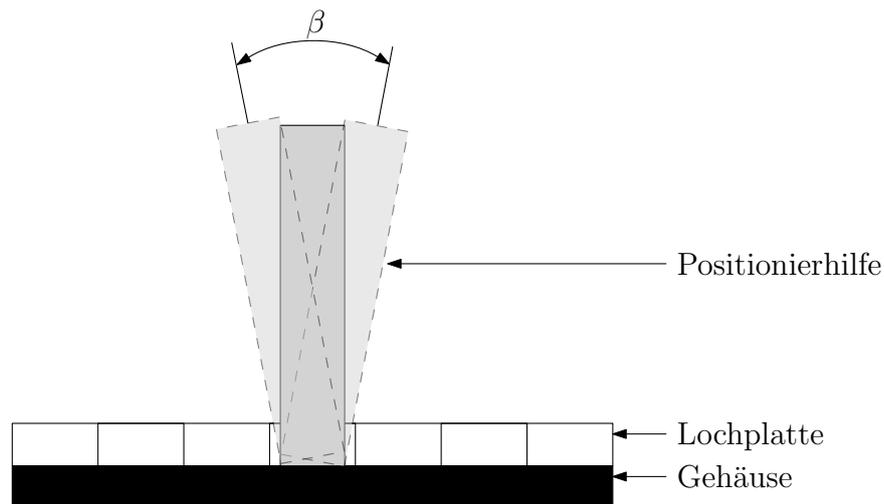


Abbildung 6.24.: Schiefe Ausrichtung der Positionierhilfe auf der Lochplatte infolge der Fertigungstoleranzen durch den **MEX**-Prozess.

durchgeführt (siehe Abb. 6.25) bis die Endpose (siehe Abb. 6.26) erreicht wird. Der ausgewählte Greifpunkt besitzt einen niedrigen z -Wert, befindet sich also am unteren Ende des Objektes. Aufgrund der Lage des Greifpunktes und der kontinuierlichen Rotation des Endeffektors tritt eine Kollision mit dem Objekt auf und die Entnahme des Bauteils schlägt fehl.

Keins der Bauteile in TS7 wird erfolgreich gegriffen und alle gedruckten Bauteile verblei-

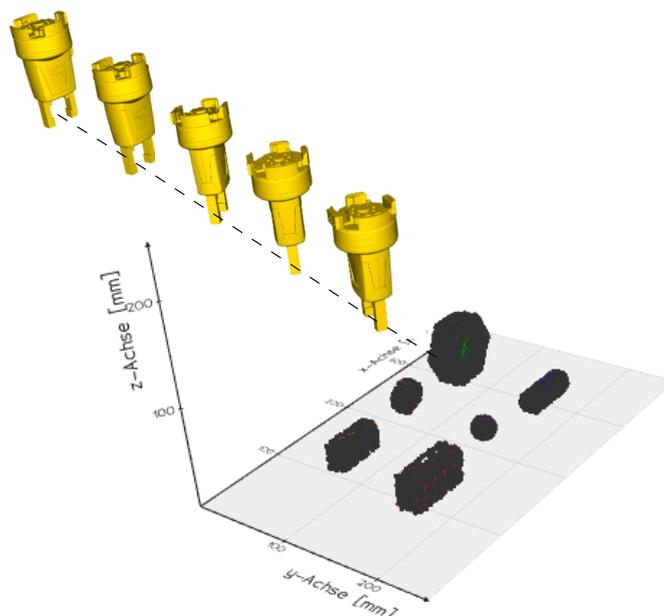


Abbildung 6.25.: Kontinuierliche Rotation des Endeffektors in TS6 zur Entnahme der *Mutter*.

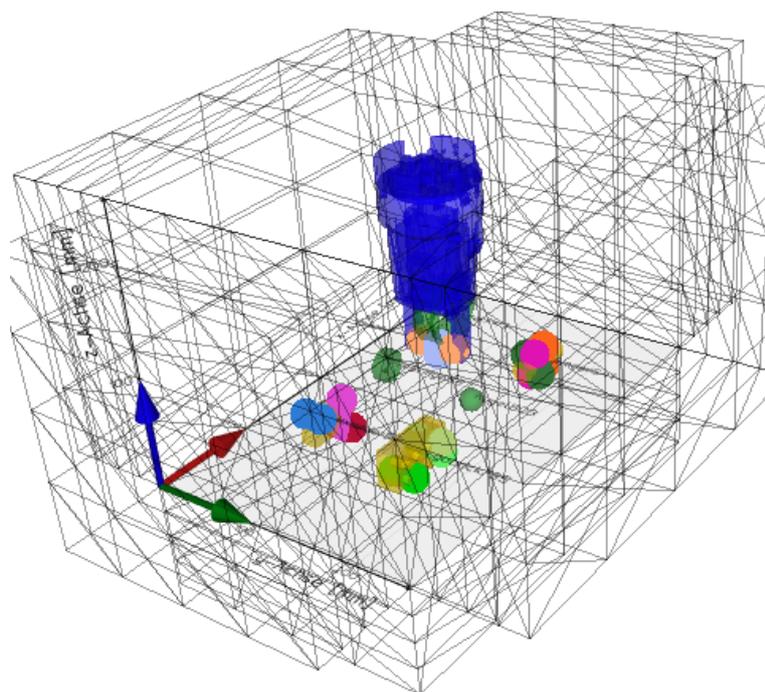


Abbildung 6.26.: Greifpunkt und Pose des Endeffektors zur Entnahme der *Mutter* in TS6.

ben im Bauraum. An dieser Stelle muss nochmal darauf hingewiesen werden, dass aus der digitalen Evaluation nur Greifpunkte für 5/6 Bauteile berechnet werden konnten. Für das Bauteil *SileaneBunny* konnte kein gültiger Greifpunkt bestimmt werden (siehe Kapitel [6.5.3](#)). Bei den restlichen Objekten tritt, vor Erreichung der Greifposition, ein Sicherheitsstop ein. Die Höhe des *SileaneBunny* definiert die maximale z -Koordinate und somit die Höhe des Pulverbetts. Da alle anderen Bauteile auf der Grundplatte des Bauraums positioniert sind und deutlich kleinere Abmaße aufweisen, müssen nicht nur die Greiferfinger in das Pulverbett eindringen, sondern auch das Gehäuse des Greifers. Hierdurch werden die Kräfte auf den Roboter so groß, dass die Greifposition nicht erreicht wird.

6.7. Diskussion der Ergebnisse

Im Vergleich zur digitalen Evaluation zeigt sich beim realen Demonstrator eine geringere Erfolgsquote bei den Handhabungsvorgängen. Bei einer reinen Betrachtung der Erfolgsquoten sinkt der Wert von 95.8 % (23/24) auf 62.5 % (15/24). Die deutlich niedrigere Erfolgsquote im realen Testset lässt sich allerdings auf drei Ursachen zurückführen. Die manuelle Rekonstruktion der Objekte ist im Produktionsbetrieb nicht notwendig.

Hier entspricht die Positionierung der Bauteile exakt der in den bitmap bestimmten Position. Da zur Überprüfung der Erreichbarkeit bisher eine inkrementelle Verschiebung des Endeffektors in *vtk* entlang eines Vektors \vec{o} verwendet wird (siehe Abschnitt [5.4.2.3](#)), wird die tatsächlich ausgeführte kontinuierliche Rotation des Endeffektors nicht berücksichtigt. Zudem ist bei den Randbedingungen bisher keine Limitierung für die Eindringtiefe des Endeffektors gesetzt und somit können auftretende Sicherheitsstops nicht detektiert werden. Wird hierfür ein Grenzwert gesetzt, erhöht sich zwar nicht die Anzahl der erfolgreich entnommenen Objekte, allerdings lässt sich somit die Positionierung der Objekte beeinflussen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde erfolgreich eine automatisierte Bauteilentnahme im additiven Postprozess im [BJ](#) umgesetzt und sowohl digital als auch in einem realen Testbed evaluiert. Das Gesamtsystem bietet die Möglichkeit eine individuelle Bauteilhandhabung nach dem Druck zu planen und eine Entnahmereihenfolge für die Objekte abzuleiten. Zusammen mit der mechanischen Bewertung der Greifpunkte und der Rekonstruktion der Anlagendaten lässt sich der Entnahmeprozess absichern. Sodass das System die Grundlage für eine sichere und stabile Automation des Prozesses bildet. Hierfür werden zunächst Greifpunkte für unterschiedliche Kontaktformen und Schlussarten mittels analytischer Verfahren bestimmt, um mit einem Endeffektor ein möglichst breites Bauteilspektrum handhaben zu können. Zur Bestimmung der Greifpunkte stehen drei separate Algorithmen zur Verfügung, die je nach Kombination aus Objekt und Wirkflächen des Endeffektors ausgewählt werden können. In der Evaluation zeigen die Algorithmen ein robustes Verhalten und generieren zuverlässig eine Vielzahl an Greifpunkten für ein breites Bauteilspektrum. Aufgrund des generischen Aufbaus können die Algorithmen für für andere Pick-and Place Aufgaben, außerhalb des [BJ](#), eingesetzt werden.

Die anschließende mechanische Greifpunktbewertung basiert auf einem prozessspezifischen Bauteilmodell. Hierfür wurde aus den im Präprozessor erzeugten bitmaps eine Bauteilrekonstruktion vorgenommen. Diese Rekonstruktion basiert auf einem iterativen, voxelbasierten Verfahren und verwendet die eingestellte Diskretisierung ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) aus den Daten im Präprozessor. Somit lassen sich die geometrischen Unterschiede zwischen der originalen STL-Datei und dem „tatsächlich“ gedruckten Bauteil abbilden. Zwar erhöht sich durch die Instanziierung der Voxel der Speicherbedarf für die [CAD](#)-Modelle, jedoch zeigt sich eine deutlich bessere Approximation der entstehenden Geometrie.

Als Metrik zur Selektion der Greifpunkte werden mechanische Parameter mit Hilfe der rekonstruierten Bauteildatei berechnet. Hierfür wurde ein automatisiertes [FEM](#)-Verfahren zur Bestimmung der resultierenden Spannungen im statischen und dynamischen Zu-

stand entwickelt. Mit Hilfe der **FEM** lässt sich somit die Belastung nicht nur während der Aufnahme des Bauteils evaluieren, sondern auch während des Handhabungsprozesses. Integriert in die mechanische Bewertung ist ein idealisiertes transversal isotropes Materialverhalten, welches aus bestehenden Literaturquellen mit dem *Reuss*-Modell entwickelt wurde.

Durchgeführte Tests zeigten die Notwendigkeit des voxelbasierten Modells. Zwischen beiden Modellen ergaben sich signifikante Unterschiede ($\times 10^3$) bezüglich der berechneten Dehnungen $\underline{\epsilon}$ und Spannungen $\underline{\sigma}$. Die vorherrschende Differenz ist abhängig von der gewählten Füllstruktur, da diese die Voxelinstanzen definiert. Steht für die mechanische Bewertung kein prozessspezifisches Bauteilmodell zur Verfügung, sollte ein geeigneter Sicherheitswert S berücksichtigt werden. Ist dies nicht der Fall, resultieren deutlich geringere Spannungen als am letztendlich gedruckten Bauteil.

Für die Rekonstruktion der Bauteildaten werden zunächst die **STL**-Dateien mit Hilfe erzeugter Hilfsvolumina aus konvexen Hüllen identifiziert und anschließend transformiert. Ursprünglich wurde für die Transformation der **ICP**-Algorithmus eingesetzt, jedoch zeigte sich bei der Evaluation eine unzureichende Ergebnisgüte für einige Transformationen, da nicht immer eine ausreichend gute Initialisierung [Du et al., 2017] der Objekte gegeben ist. Besonders bei größeren Transformationen führte der **ICP** zu fehlerhaften Ergebnissen. Neben dem **ICP**-Algorithmus wurden deswegen zwei weitere Verfahren integriert und getestet. Hier zeigte die Kombination aus partiellem Formabgleich und **ICP**-Algorithmus (**PF+ICP**) die beste Ergebnisgüte und sollte zur Bestimmung der Transformationen verwendet werden.

Die Evaluation der entwickelten Verfahren wurde anhand 15 industrieller und alltäglicher Handhabungsobjekte mit unterschiedlicher Komplexität in insgesamt 10 Testszenarien durchgeführt. Die Testszenarien enthalten jeweils unterschiedlich viele Testobjekte, die zufällig im Bauraum positioniert sind. Eine auf dem Volumen V basierte Objekterkennung hatte in den Testszenarien eine Genauigkeit von 96.3% (52/54), wobei diese abhängig von der Anzahl an Einträgen in der Punktwolke aus den rekonstruierten Daten ist. Je mehr Einträge pro Cluster (Bauteil) vorhanden sind, desto genauer wird dessen Geometrie abgebildet. Allerdings ist dies nur bei ausreichend verfügbarem Arbeitsspeicher (engl. Random Access Memory) (**RAM**) möglich. Ist der Bauraum mit einer Vielzahl an Objekten besetzt, sollte ein Downsampling der Punkte durchgeführt werden, um die Performance des Algorithmus zu verbessern und den Speicherbedarf zu reduzieren.

Die aufgestellten Regeln für die Bauteilentnahme wurden in geometrische Randbedin-

gungen überführt und mittels Hüllgeometrien evaluiert. Somit konnten in den digitalen Testszenarien 94,4 % (51/54) Objekten erfolgreich entnommen werden. Da die geometrische Überprüfung mit Inkrementen arbeitet, sollten kleine Schritte gewählt werden, damit eine möglichst hohe Erfolgsquote resultiert. Trotzdem besteht durch die Lage der Objekte im Bauraum die Möglichkeit, keine Lösung zu erhalten. In diesem Fall muss eine Repositionierung der Objekte durchgeführt werden.

In den realen Tests konnten diese Ergebnisse für TS1-TS7 bestätigt werden. Insgesamt wurde in diesen Tests zwar nur eine Erfolgsquote von 62,5 % erzielt, allerdings wird diese Quote primär durch TS7 beeinflusst, in dem keines der 6 Objekte entnommen werden konnte. Die fehlgeschlagenen Handhabungsvorgänge in TS5 und TS6 lassen sich auf eine ungenaue Bauteilpositionierung im Demonstrator und eine unterschiedliche Bahnplanung zurückführen. Während Ersteres bei gedruckten Bauräumen automatisch vermieden wird, sollte zur Vermeidung der Kollision die Rotation des Endeffektors bei der Greifpunktselektion berücksichtigt werden. Andernfalls ist eine andere Implementierung am Roboter zu wählen, sodass dieser den Greifpunkt linear ohne Rotation des Endeffektors anfährt. Die Bauteile in TS7 waren für den Roboter, aufgrund ihrer Positionierung, nicht erreichbar. Vor dem Erreichen der Greifpositionen wurde ein Sicherheitsstop ausgelöst, da die wirkenden Kräfte die Grenzwerte überstiegen. Um dies zu vermeiden, sollte entweder ein Grenzwert für die Erreichbarkeit gesetzt werden oder eine kombinierte Lösung mit einem Absaugsystem entwickelt werden. Hierdurch könnte das überflüssige Pulver abgetragen werden und somit die Erreichbarkeit sichergestellt werden. Wird ein gesetzter Grenzwert überschritten, muss eine Repositionierung der Objekte erfolgen. TS8,9,10 konnten aufgrund der komplexen geometrischen Anordnung nicht im realen Testbed rekonstruiert werden. Hier ist allerdings ein ähnliches Verhalten für tieferliegende Objekte zu erwarten.

Neben der spezifischen Anwendung im **BJ** besitzen die entwickelten Module, bei gegebener Datengrundlage, eine allgemeingültige Anwendung. Sowohl die Greifpunktbestimmung, als auch die mechanische Greifpunktbewertung lassen sich individuell einsetzen und zeigen ein zuverlässiges Verhalten.

Des Weiteren ermöglicht der modulare Aufbau den Austausch und die Erweiterung einzelner Subsysteme, sodass eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Systems möglich ist und weiterhin als Forschungsplattform verwendet werden kann. Ebenfalls können einzelne Module in die bestehende digitale Prozesskette der additiven Fertigung integriert werden. So kann bspw. die Greifpunktbestimmung mit in den Präprozessor integriert werden, um dort direkt die Positionierung der Handhabungsobjekte zu beeinflussen

und für eine automatisierte Handhabung zu optimieren.

Trotz der erfolgreichen Evaluierung des Gesamtsystems müssen einige Komponenten kritisch diskutiert werden und enthalten Optimierungspotential. Das transversal isotrope Materialmodell stellt zum derzeitigen Zeitpunkt nur eine Abschätzung aus Literaturquellen dar. Da keine experimentellen Aufbauten und Messinstrumente zur Verfügung standen, musste auf ein vereinfachtes Modell zurückgegriffen werden. Anhand der Ergebnisse in Yegyan Kumar et al., [2019] zeigt sich jedoch ein orthotropes Materialverhalten der gesinterten Bauteile und da durch das Sintern die Anisotropie bestehen bleibt, lässt sich diese Eigenschaft auch für den Grünling vermuten. Eine Bestimmung der benötigten Kennwerte kann mittels Zugversuchen aus unterschiedlich orientierten Prüfkörpern durchgeführt werden. Damit dies nicht für jede Werkstoffkombination (Bindemittel+Pulver) durchgeführt werden muss, können Materialparameter (E, G, ν) auch numerisch mittels eines **RVE** [Ferretti et al., 2021] bestimmt werden. Hierfür müssen im **RVE** die resultierende Grenzfläche des Binders, die Porengröße sowie die Druckrichtung in einem 3D-Element modelliert werden. Zusätzlich wurde für die automatisierte **FEM**-Analyse ein linear elastisches Materialverhalten angenommen. Je nach Anlagenparametern (Sättigung, Bindemittel) können allerdings Grünlinge mit einem porösen Materialverhalten resultieren. Dies sollte bei der Formulierung der Grundgleichungen für die **FEM** berücksichtigt werden [Li et al., 2019]. Die Vernetzung der Bauteile im Präprozess der **FEM** wird mit einer globalen Netzgröße durchgeführt, damit ein automatisierter Durchlauf des Algorithmus möglich ist. Hier kann durch den Einsatz adaptiver Vernetzungsmethoden [Tristano et al., 2003] gezielt eine lokale Anpassung der Netzgrößen und somit eine Verbesserung der Ergebnisgüte erreicht werden. Eingangswerte für die mechanische Belastung sind aktuell die Streckgrenze $R_{e,m}$ der Matrix, sowie die berechneten Hauptspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Nach Philipp Lechner, [2021] kann die Evaluation mit dem *Mohr-Coulomb*-Modell [Labuz et al., 2015]

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (7.1)$$

in Kombination mit dem Weibullmodul [Bennett, 1991]

$$P = 1 - \exp - \frac{\sigma^m}{\sigma_0^m}, \quad (7.2)$$

deutlich bessere Ergebnisse für die Ausfallwahrscheinlichkeit P liefern. Voraussetzung hierfür sind dedizierte Datensätze zur jeweiligen Materialkombination. Die beiden Materialkonstanten beschreiben den Zusammenhalt des Materials (c) und den internen

Reibungswinkel (ϕ). Sie können durch zwei unterschiedliche Versuche (Zugversuch, Biegeversuch) bestimmt werden. Geometrisch betrachtet begrenzt die maximal erlaubte Schubspannung τ den Mohrschen-Spannungskreis (siehe Abb. [7.1](#)). Für den Abgleich

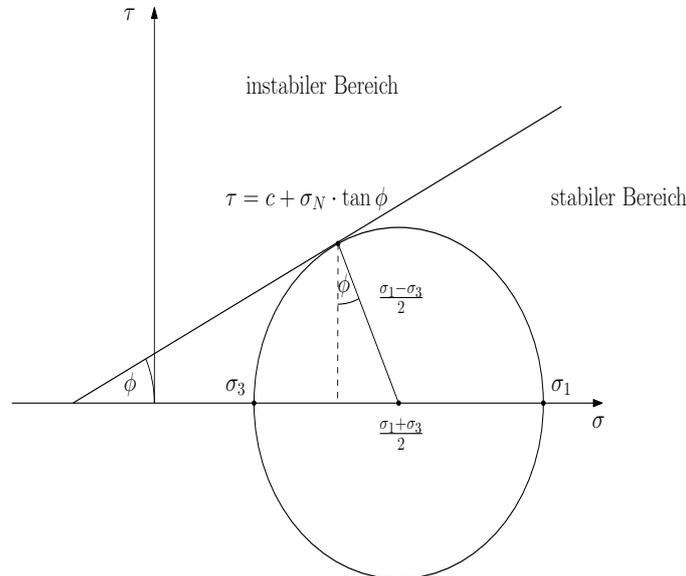


Abbildung 7.1.: Darstellung des Mohrschen Spannungskreises mit dem Versagenskriterium nach Mohr-Coulomb.

zwischen den offline [STL](#)-Dateien und den rekonstruierten Daten werden aktuell Hilfsgeometrien, in Form konvexer Hüllen verwendet und anhand der Volumina V evaluiert. Durch diese singuläre Kenngröße können falsche Zuweisungen entstehen, besonders in Datensätzen mit Bauteilen ähnlicher Größe. Eine Verbesserung an dieser Stelle liefert der zusätzliche Formabgleich der Bauteile. Hierfür könnte bspw. eine Featurebasierte Erkennung [Howarth et al., [2009](#)], KI-Methoden [Yang et al., [2022](#)] oder graphenbasierte Modelle [Gehrig et al., [2022](#)] eingesetzt werden, um so die Stabilität zu erhöhen.

Die Auswahl des Verfahrens zur Greifpunktbestimmung basiert auf der subjektiven Entscheidung des Bedieners. Hierfür bietet sich ein automatisiertes Vorschlagssystem basierend auf der Kombination aus Handhabungsobjekt und Endeffektor an. Eingesetzt können sowohl analytische Ansätze, in denen die Form des Bauteils quantifiziert wird, als auch datenbasierte Ansätze, die mit empirischen Klassifikationen trainiert wurden [Qi et al., [2016](#)]. Mit Hilfe der entwickelten analytischen Algorithmen ist auch das Erstellen von Trainingsdaten möglich, um ein datenbasiertes Modell für die Handhabung bereitzustellen. Allerdings ist für dessen Einsatz der virtuelle Bauraum zwingend erforderlich, da ansonsten keine Eingangsdaten für das Modell zur Verfügung stehen und im [B.J](#)-Prozess keine optischen Messinstrumente eingesetzt werden können.

Die Laufzeit der individuellen Modelle kann durch Parallelisierung und Vektorisierung weiter optimiert werden. Besonders die Greifpunktbestimmung (siehe Kapitel 3) kann bei einer Vielzahl an Triangulationen sehr zeitintensiv sein. Weiteres Optimierungspotential bietet die Verwendung eines anderen Datenformats für die Bauteile. Im STL-Format wird jedes Element gespeichert, jeder Eckpunkt ist demnach mehrmals vorhanden. Im Gegensatz dazu wird im engl. Virtual Reality Modelling Language (VRML)-Format jeder Eckpunkt nur einmalig gespeichert und benötigt somit weniger Speicherplatz.

Literaturverzeichnis

- Akinola, Iretiayo et al. (2018). *Workspace Aware Online Grasp Planning*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1806.11402>.
- Alammar, Amirah et al. (2022). „Additive Manufacturing Technologies: Current Status and Future Perspectives“. In: *Journal of prosthodontics : official journal of the American College of Prosthodontists* 31.S1, S. 4–12. DOI: [10.1111/jopr.13477](https://doi.org/10.1111/jopr.13477).
- Aleotti, Jacopo und Stefano Caselli (2012). „A 3D shape segmentation approach for robot grasping by parts“. In: *Robotics and Autonomous Systems* 60.3, S. 358–366. ISSN: 09218890. DOI: [10.1016/j.robot.2011.07.022](https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.07.022).
- Ambriz, Steven et al. (2017). „Material handling and registration for an additive manufacturing-based hybrid system“. In: *Journal of Manufacturing Systems* 45, S. 17–27. ISSN: 02786125. DOI: [10.1016/j.jmsy.2017.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.07.003).
- Anderl, Reiner und Dietmar Trippner, Hrsg. (2000). *STEP STandard for the Exchange of Product Model Data*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 978-3-519-06377-3. DOI: [10.1007/978-3-322-89096-2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-89096-2).
- Andersen, Ulrik Vølcker et al. (2013). „In-process 3D geometry reconstruction of objects produced by direct light projection“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68.1-4, S. 565–573. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-013-4778-3](https://doi.org/10.1007/s00170-013-4778-3).
- Ansys-Mechanical (2022). „Ansys Academic Research Mechanical, Release 2022 R1, ANSYS, Inc.“ In.
- Arens, Tilo et al. (2018). *Mathematik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-56740-1. DOI: [10.1007/978-3-662-56741-8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56741-8).
- Arndt, Alexander et al. (2018). „Automatisierung in der kundenindividuellen Additiven Serienfertigung“. In: *Additive Serienfertigung*. Hrsg. von Roland Lachmayer, Rene bastian Lippert und Stefan Kaiерle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–15. ISBN: 978-3-662-56462-2. DOI: [10.1007/978-3-662-56463-9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56463-9)¹.

- Aroca, Rafael Vidal et al. (2017). „Sequential additive manufacturing: automatic manipulation of 3D printed parts“. In: *Rapid Prototyping Journal* 23.4, S. 653–659. ISSN: 1355-2546. DOI: [10.1108/RPJ-02-2016-0029](https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2016-0029).
- Arun, K. S., T. S. Huang und S. D. Blostein (1987). „Least-squares fitting of two 3-d point sets“. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 9.5, S. 698–700. ISSN: 0162-8828. DOI: [10.1109/TPAMI.1987.4767965](https://doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767965).
- Asif, Umar, Mohammed Bennamoun und Ferdous Sohel (2014). „Model-Free Segmentation and Grasp Selection of Unknown Stacked Objects“. In: *Computer vision - ECCV 2014*. Hrsg. von David Fleet et al. Bd. 8693. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, S. 659–674. ISBN: 978-3-319-10601-4. DOI: [10.1007/978-3-319-10602-1_{\text{underscore}}43](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_{\text{underscore}}43).
- Aurenhammer, Franz (1991). „Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure“. In: *ACM Computing Surveys* 23.3, S. 345–405. ISSN: 0360-0300. DOI: [10.1145/116873.116880](https://doi.org/10.1145/116873.116880).
- Babin, Vincent und Clément Gosselin (2021). „Mechanisms for Robotic Grasping and Manipulation“. In: *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 4.1, S. 573–593. ISSN: 2573-5144. DOI: [10.1146/annurev-control-061520-010405](https://doi.org/10.1146/annurev-control-061520-010405).
- Bacciaglia, Antonio et al. (2023). „Geometry reconstruction for additive manufacturing: From G-CODE to 3D CAD model“. In: *Materials Today: Proceedings* 75, S. 16–22. ISSN: 22147853. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.09.496](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.496).
- Bafaluy Ojea, Sergi et al. (2023). „Binder jet green parts microstructure: advanced quantitative analysis“. In: *Journal of Materials Research and Technology* 23, S. 3974–3986. ISSN: 22387854. DOI: [10.1016/j.jmrt.2023.02.051](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.051).
- Bartz-Beielstein, Thomas et al. (2014). „Evolutionary Algorithms“. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 4.3, S. 178–195. ISSN: 19424787. DOI: [10.1002/widm.1124](https://doi.org/10.1002/widm.1124).
- Barui, Srimanta et al. (2020). „Probing Ink-Powder Interactions during 3D Binder Jet Printing Using Time-Resolved X-ray Imaging“. In: *ACS applied materials & interfaces* 12.30, S. 34254–34264. DOI: [10.1021/acsami.0c03572](https://doi.org/10.1021/acsami.0c03572).
- Becker, Pascal et al. (2019). „Flexible Object Handling in Additive Manufacturing with Service Robotics“. In: *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*. IEEE, S. 121–128. ISBN: 978-1-7281-0851-3. DOI: [10.1109/IEA.2019.8714783](https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8714783).
- Bennett, J. (1991). *A Weibull brittle material failure model for the ABAQUS computer program*. DOI: [10.2172/5643325](https://doi.org/10.2172/5643325).

- Berner, Julius et al. (2021). *The Modern Mathematics of Deep Learning*. DOI: [10.48550/arXiv.2105.04026](https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.04026).
- Bohg, Jeannette et al. (2014). „Data-Driven Grasp Synthesis—A Survey“. In: *IEEE Transactions on Robotics* 30.2, S. 289–309. ISSN: 1552-3098. DOI: [10.1109/TRO.2013.2289018](https://doi.org/10.1109/TRO.2013.2289018).
- Bollen, Brian et al. (2021). *Reeb Graph Metrics from the Ground Up*. URL: <http://arxiv.org/pdf/2110.05631v2>.
- Bonaccorso, Giuseppe (July 2017). *Machine learning algorithms: A reference guide to popular algorithms for data science and machine learning*. Birmingham und Mumbai: Packt. ISBN: 978-1-78588-962-2.
- Bone, Gary M., Andrew Lambert und Mark Edwards (2008). „Automated modeling and robotic grasping of unknown three-dimensional objects“. In: *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 292–298. ISBN: 978-1-4244-1646-2. DOI: [10.1109/ROBOT.2008.4543223](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543223).
- Borg, Mikael (6.2022). „Automatization of de-powdering process for binder jetting technology“. Masterarbeit. Uppsala: Uppsala University.
- Borst, Ch., M. Fischer und G. Hirzinger (2004). „Grasp planning: how to choose a suitable task wrench space“. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*. IEEE, 319–325 Vol.1. ISBN: 0-7803-8232-3. DOI: [10.1109/ROBOT.2004.1307170](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1307170).
- Boulbes, Raphael Jean (2020). „Contact“. In: *Troubleshooting Finite-Element Modeling with Abaqus*. Hrsg. von Raphael Jean Boulbes. Cham: Springer International Publishing, S. 227–295. ISBN: 978-3-030-26739-1. DOI: [10.1007/978-3-030-26740-7_{\text{underscore}}7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26740-7_{\text{underscore}}7).
- Brégier, Romain et al. (2017). „Symmetry Aware Evaluation of 3D Object Detection and Pose Estimation in Scenes of Many Parts in Bulk“. In: *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*.
- Budiansky, Bernard (1983). „Micromechanics“. In: *Computers & Structures* 16.1-4, S. 3–12. ISSN: 00457949. DOI: [10.1016/0045-7949\(83\)90141-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(83)90141-4).
- Buxbaum, Hans-Jürgen (2020). *Mensch-Roboter-Kollaboration*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-28306-3. DOI: [10.1007/978-3-658-28307-0](https://doi.org/10.1007/978-3-658-28307-0).
- Cabo Rios, Alberto et al. (2022). „Sintering anisotropy of binder jetted 316L stainless steel: part I – sintering anisotropy“. In: *Powder Metallurgy* 65.4, S. 273–282. ISSN: 0032-5899. DOI: [10.1080/00325899.2021.2020485](https://doi.org/10.1080/00325899.2021.2020485).

- Cai, Jianchao et al. (2021). „Lucas-Washburn Equation-Based Modeling of Capillary-Driven Flow in Porous Systems“. In: *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 37.5, S. 1623–1636. DOI: [10.1021/acs.langmuir.0c03134](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c03134).
- Calabrese, Maurizio et al. (2022). „Nesting algorithm for optimization part placement in additive manufacturing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119.7-8, S. 4613–4634. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-021-08130-y](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08130-y).
- Caldera, Shehan, Alexander Rassau und Douglas Chai (2018). „Review of Deep Learning Methods in Robotic Grasp Detection“. In: *Multimodal Technologies and Interaction* 2.3, S. 57. DOI: [10.3390/mti2030057](https://doi.org/10.3390/mti2030057).
- Calli, Berk, Martijn Wisse und Pieter Jonker (2011). „Grasping of unknown objects via curvature maximization using active vision“. In: *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Hrsg. von IEEE Staff. [Place of publication not identified]: IEEE, S. 995–1001. ISBN: 978-1-61284-456-5. DOI: [10.1109/IROS.2011.6094686](https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094686).
- Caple, Jodi, John Byrd und Carl N. Stephan (2017). „Elliptical Fourier analysis: fundamentals, applications, and value for forensic anthropology“. In: *International journal of legal medicine* 131.6, S. 1675–1690. DOI: [10.1007/s00414-017-1555-0](https://doi.org/10.1007/s00414-017-1555-0).
- Carnavas, P. C. (1998). „Elastic properties of compacted metal powders“. In: *Journal of Materials Science* 33.18, S. 4647–4655. ISSN: 0022-2461. DOI: [10.1023/A:1004445527430](https://doi.org/10.1023/A:1004445527430).
- Chen, Ling et al. (2023). „Binder Jet 3D Printing of 316L Stainless Steel: Orthogonal Printing and Sintering Process Optimization“. In: *Advanced Engineering Materials* 25.5, S. 2200641. ISSN: 1438-1656. DOI: [10.1002/adem.202200641](https://doi.org/10.1002/adem.202200641).
- Chen, Rui et al. (2020). „Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review“. In: *Chemosphere* 259, S. 127452. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.127452](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127452).
- Christen, Daniel S. (2010). „Filtrieren“. In: *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik*. Hrsg. von Daniel S. Christen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 343–366. ISBN: 978-3-540-88974-8. DOI: [10.1007/978-3-540-88975-5_12](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88975-5_12).
- Christensen, R., H. Schantz und J. Shapiro (1992). „On the range of validity of the Mori-Tanaka method“. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 40.1, S. 69–73. ISSN: 00225096. DOI: [10.1016/0022-5096\(92\)90240-3](https://doi.org/10.1016/0022-5096(92)90240-3).

- Cimrman, Robert, Vladimír Lukeš und Eduard Rohan (2019). „Multiscale finite element calculations in Python using SfePy“. In: *Advances in Computational Mathematics* 45.4, S. 1897–1921. ISSN: 1019-7168. DOI: [10.1007/s10444-019-09666-0](https://doi.org/10.1007/s10444-019-09666-0).
- Ciocarlie, Matei, Corey Goldfeder und Peter Allen (2007). *Dexterous Grasping via Eigengrasps: A Low-dimensional Approach to a High-complexity Problem*.
- Cohen-Steiner, David, Éric Colin de Verdière und Mariette Yvinec (2002). „Conforming Delaunay triangulations in 3D“. In: *Proceedings of the eighteenth annual symposium on Computational geometry*. Hrsg. von Ferran Hurtado et al. New York, NY, USA: ACM, S. 199–208. ISBN: 1581135041. DOI: [10.1145/513400.513425](https://doi.org/10.1145/513400.513425).
- Collins, Jack et al. (2021). „A Review of Physics Simulators for Robotic Applications“. In: *IEEE Access* 9, S. 51416–51431. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3068769](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068769).
- Costanzo, Marco, Giuseppe de Maria und Ciro Natale (2023). „Detecting and Controlling Slip through Estimation and Control of the Sliding Velocity“. In: *Applied Sciences* 13.2, S. 921. DOI: [10.3390/app13020921](https://doi.org/10.3390/app13020921).
- Deisenroth, Marc Peter, A. Aldo Faisal und Cheng Soon Ong (2020). *Mathematics for machine learning*. Cambridge u. a.: Cambridge University Press. ISBN: 978-1108455145. DOI: [10.1017/9781108679930](https://doi.org/10.1017/9781108679930).
- Depierre, Amaury, Emmanuel Dellandréa und Liming Chen (2018). „Jacquard: A Large Scale Dataset for Robotic Grasp Detection“. In: URL: <http://arxiv.org/pdf/1803.11469v2>.
- Desktop-Metal (2024). *X24Pro Specification*. Hrsg. von Desktop Metal. URL: https://www.desktopmetal.com/uploads/Xseries_SPC-X25Pro_En_220304.pdf.
- Dharbaneshwer, S. J. et al. (2021). „Finite element-based grasp analysis using contact pressure maps of a robotic gripper“. In: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 43.4. ISSN: 1678-5878. DOI: [10.1007/s40430-021-02907-8](https://doi.org/10.1007/s40430-021-02907-8).
- Diener, Sarah et al. (2023). „Ink development for the additive manufacturing of strong green parts by layerwise slurry deposition (LSD–print)“. In: *Journal of the American Ceramic Society* 106.5, S. 2752–2763. ISSN: 0002-7820. DOI: [10.1111/jace.18951](https://doi.org/10.1111/jace.18951).
- Digital Metal DPS 1000 (2020). URL: <https://digitalmetal.tech/digital-metal-first-depowdering-metal-binder-jetting/>.
- Dohrmann, C. R., S. W. Key und M. W. Heinstein (2000). „Methods for connecting dissimilar three-dimensional finite element meshes“. In: *International Journal for*

- Numerical Methods in Engineering* 47.5, S. 1057–1080. ISSN: 0029-5981. DOI: [10.1002/\(SICI\)1097-0207\(20000220\)47:5<>1057::AID-NME821>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(20000220)47:5<>1057::AID-NME821>3.0.CO;2-G).
- Doubrovski, E. L. et al. (2015). „Voxel-based fabrication through material property mapping: A design method for bitmap printing“. In: *Computer-Aided Design* 60, S. 3–13. ISSN: 00104485. DOI: [10.1016/j.cad.2014.05.010](https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.05.010).
- Du, Shaoyi et al. (2017). „Robust iterative closest point algorithm based on global reference point for rotation invariant registration“. In: *PloS one* 12.11, e0188039. DOI: [10.1371/journal.pone.0188039](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188039).
- Edelstahl, Team (2023). „Datenblatt 1.4762“. In: URL: <https://www.teamedelstahl.de/wp-content/uploads/2021/04/1.4762.pdf>.
- El-Khoury, Sahar, Anis Sahbani und Veronique Perdereau (2007). „Learning the natural grasping component of an unknown object“. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 2957–2962. ISBN: 978-1-4244-0911-2. DOI: [10.1109/IROS.2007.4399052](https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399052).
- Enneti, Ravi K. und Kevin C. Prough (2019). „Effect of binder saturation and powder layer thickness on the green strength of the binder jet 3D printing (BJ3DP) WC-12%Co powders“. In: *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 84, S. 104991. ISSN: 02634368. DOI: [10.1016/j.ijrmhm.2019.104991](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.104991).
- Ertel, Wolfgang (2021). *Grundkurs Künstliche Intelligenz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-32074-4. DOI: [10.1007/978-3-658-32075-1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-32075-1).
- Eshelby, J. D. (1957). „The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems“. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 241.1226, S. 376–396. ISSN: 00804630. URL: <http://www.jstor.org/stable/100095> (besucht am 14. 06. 2023).
- Fantoni, Gualtiero et al. (2014). „Grasping devices and methods in automated production processes“. In: *CIRP Annals* 63.2, S. 679–701. ISSN: 00078506. DOI: [10.1016/j.cirp.2014.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.006).
- Feldmann, Klaus, Volker Schöppner und Günter Spur, Hrsg. (2014). *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. Bd. 5. Edition Handbuch der Fertigungstechnik / hrsg. von Günter Spur. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-42827-0.

- Fenner, R. T. (1983). „The boundary integral equation (boundary element) method in engineering stress analysis“. In: *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 18.4, S. 199–205. ISSN: 0309-3247. DOI: [10.1243/03093247V184199](https://doi.org/10.1243/03093247V184199).
- Ferchow, Julian et al. (2022). „Design and validation of integrated clamping interfaces for post-processing and robotic handling in additive manufacturing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 118.11-12, S. 3761–3787. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-021-08065-4](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08065-4).
- Fernandez, C. et al. (2004). *A Decision Tree Based Approach to Grasp Synthesis*. Hrsg. von Systems Engineering and Automation Division Miguel Hernandez University. URL: https://lcsi.umh.es/docs/papers/2004_decisiontree.pdf.
- Ferrano, Fabian et al. (2023). „Process-Structure Coupled Simulation of Additive Manufactured Components“. In: *Polymers* 15.4. DOI: [10.3390/polym15040949](https://doi.org/10.3390/polym15040949).
- Ferretti, Patrich et al. (2021). „Representative Volume Element (RVE) Analysis for Mechanical Characterization of Fused Deposition Modeled Components“. In: *Polymers* 13.20. DOI: [10.3390/polym13203555](https://doi.org/10.3390/polym13203555).
- Fine, Tomer, Guy Zaidner und Amir Shapiro (2021). „Grasping Assisting Algorithm in Tele-Operated Robotic Gripper“. In: *Applied Sciences* 11.6, S. 2640. DOI: [10.3390/app11062640](https://doi.org/10.3390/app11062640).
- Fischler, Martin A. und Robert C. Bolles (1981). „Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography“. In: *Commun. ACM* 24, S. 381–395. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:972888>.
- Fottner, Johannes et al. (2022). *Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-63972-6. DOI: [10.1007/978-3-662-63973-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63973-3).
- Gaub, Heinz (2016). „Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies“. In: *Reinforced Plastics* 60.6, S. 401–404. ISSN: 00343617. DOI: [10.1016/j.repl.2015.09.004](https://doi.org/10.1016/j.repl.2015.09.004).
- Gebauer, Daniel et al. (2023). „Grasp Analysis for the Robot-Based Manipulation of Pre-Assembled Cables with Electrical Connectors“. In: *Applied Sciences* 13.11, S. 6462. DOI: [10.3390/app13116462](https://doi.org/10.3390/app13116462).
- Gebhardt, Andreas (2016). *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser. ISBN: 978-3446444010. URL: <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446444010>.

- Gebhardt, Andreas, Julia Kessler und Laura Thurn (2016). *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Hanser eLibrary. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-44672-4. DOI: [10.3139/9783446448452](https://doi.org/10.3139/9783446448452).
- (2018). *3D printing: understanding additive manufacturing*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Gehrig, Daniel und Davide Scaramuzza (2022). *Pushing the Limits of Asynchronous Graph-based Object Detection with Event Cameras*. DOI: [10.48550/arXiv.2211.12324](https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.12324).
- George, Abraham, Mohammad Ali und Nikolaos Papakostas (2021). „Utilising robotic process automation technologies for streamlining the additive manufacturing design workflow“. In: *CIRP Annals* 70.1, S. 119–122. ISSN: 00078506. DOI: [10.1016/j.cirp.2021.04.017](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.017).
- Gibson, Ian et al., Hrsg. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-030-56126-0. DOI: [10.1007/978-3-030-56127-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7).
- Gleadall, Andrew, Ian Ashcroft und Joel Segal (2018). „VOLCO: A predictive model for 3D printed microarchitecture“. In: *Additive Manufacturing* 21, S. 605–618. ISSN: 22148604. DOI: [10.1016/j.addma.2018.04.004](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.004).
- Godec, Damir et al. (2022). *A Guide to Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-031-05862-2. DOI: [10.1007/978-3-031-05863-9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9).
- Goix, Sylvaine et al. (2014). „Environmental and health impacts of fine and ultrafine metallic particles: assessment of threat scores“. In: *Environmental research* 133, S. 185–194. DOI: [10.1016/j.envres.2014.05.015](https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.05.015).
- Gottschalk, S., M. C. Lin und D. Manocha (1996). „OBBTree“. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Hrsg. von John Fujii. New York, NY, USA: ACM, S. 171–180. ISBN: 0897917464. DOI: [10.1145/237170.237244](https://doi.org/10.1145/237170.237244).
- Greenacre, Michael et al. (2022). „Principal component analysis“. In: *Nature Reviews Methods Primers* 2.1. DOI: [10.1038/s43586-022-00184-w](https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w).
- Grewe, Lynne und Avinash C. Kak (1995). „Interactive Learning of a Multiple-Attribute Hash Table Classifier for Fast Object Recognition“. In: *Computer Vision and Image Understanding* 61.3, S. 387–416. ISSN: 1077-3142. DOI: [10.1006/cviu.1995.1030](https://doi.org/10.1006/cviu.1995.1030). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314285710302>.

- Gross, Dietmar et al. (2017). *Elastostatik*. 13., aktualisierte Auflage. Bd. 2. Lehrbuch. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 9783662536780.
- Gupta, Rajesh et al., Hrsg. (2020). *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. New York, NY, USA: ACM. ISBN: 9781450379984. DOI: [10.1145/3394486](https://doi.org/10.1145/3394486).
- Hällgren, Sebastian, Lars Pejryd und Jens Ekengren (2016). „(Re)Design for Additive Manufacturing“. In: *Procedia CIRP* 50, S. 246–251. ISSN: 22128271. DOI: [10.1016/j.procir.2016.04.150](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.150).
- Hamano, Ryohei et al. (2021). „Mechanical anisotropy and fracture mode of binder jetting 3D printed calcium sulfate moldings“. In: *Applied Materials Today* 25, S. 101160. ISSN: 23529407. DOI: [10.1016/j.apmt.2021.101160](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101160).
- Hapgood, Karen P. et al. (2002). „Drop penetration into porous powder beds“. In: *Journal of colloid and interface science* 253.2, S. 353–366. ISSN: 0021-9797. DOI: [10.1006/jcis.2002.8527](https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8527).
- Harada, Kensuke et al. (2011). „Grasp planning for parallel grippers with flexibility on its grasping surface“. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. IEEE, S. 1540–1546. ISBN: 978-1-4577-2138-0. DOI: [10.1109/ROBIO.2011.6181508](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2011.6181508).
- Hernandez Korner, Mario Enrique et al. (2020). „Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0“. In: *Metals* 10.8, S. 1061. DOI: [10.3390/met10081061](https://doi.org/10.3390/met10081061).
- Hesse, Stefan (2010). *Grundlagen der Handhabungstechnik: Mit 15 Tabellen sowie 17 Übungsaufgaben und 104 Kontrollfragen*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-41872-1. DOI: [41872](https://doi.org/41872).
- (2011). *Greifertechnik: Effektoren für Roboter und Automaten*. München: Hanser. ISBN: 9783446427419. URL: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446427419>.
- Hill, R. (1965). „Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials—III. self-consistent model“. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 13.4, S. 189–198. ISSN: 00225096. DOI: [10.1016/0022-5096\(65\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(65)90008-6).
- Himanshu J, Vineet K (2022). „3D Printing Market by Technology (Stereolithography (SLA), Selective laser sintering (SLS), Electron beam melting (EBM), Fused deposition modeling (FDM), Laminated object manufacturing (LOM), Others), by Application (Consumer Electronics, Industrial, Aerospace, Automotive, Healthcare, Defense, Education and research, Others): Global Opportunity Analysis and

- Industry Forecast, 2020-2030“. In: URL:
<https://www.alliedmarketresearch.com/3d-printing-market>.
- Honarpardaz, M., M. Meier und R. Haschke (2017). „Fast grasp tool design: From force to form closure“. In: *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, S. 782–788. ISBN: 978-1-5090-6781-7. DOI: [10.1109/COASE.2017.8256199](https://doi.org/10.1109/COASE.2017.8256199).
- Horn, Alfred (1954). „Doubly Stochastic Matrices and the Diagonal of a Rotation Matrix“. In: *American Journal of Mathematics* 76.3, S. 620. ISSN: 00029327. DOI: [10.2307/2372705](https://doi.org/10.2307/2372705).
- Horstkotte, Rainer et al. (2021). „Generation and evaluation of automation concepts of additive process chains with Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)“. In: *Procedia CIRP* 96, S. 97–102. ISSN: 22128271. DOI: [10.1016/j.procir.2021.01.059](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.059).
- Howarth, J. W., H.H.C. Bakker und R. C. Flemmer (2009). „Feature-based Object Recognition“. In: *2009 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*. IEEE, S. 375–379. ISBN: 978-1-4244-2712-3. DOI: [10.1109/ICARA.2000.4804015](https://doi.org/10.1109/ICARA.2000.4804015).
- Hu, Yinlin et al. (2018). *Segmentation-driven 6D Object Pose Estimation*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1812.02541>.
- Huang, Isabella et al. (2022a). „DefGraspSim: Physics-based simulation of grasp outcomes for 3D deformable objects“. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 7.3, S. 6274–6281. ISSN: 2377-3766. DOI: [10.1109/LRA.2022.3158725](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3158725). URL: <http://arxiv.org/pdf/2203.11274v1>.
- Huang, Xiaoqian et al. (2022b). „Real-time grasping strategies using event camera“. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 33.2, S. 593–615. ISSN: 0956-5515. DOI: [10.1007/s10845-021-01887-9](https://doi.org/10.1007/s10845-021-01887-9).
- Huang, Zheng-Ming und Ye-Xin Zhou (2012). *Strength of Fibrous Composites*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-22957-2. DOI: [10.1007/978-3-642-22958-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22958-9).
- Huebner, K. und D. Kragic (2008). „Selection of robot pre-grasps using box-based shape approximation“. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, S. 1765–1770. ISBN: 978-1-4244-2057-5. DOI: [10.1109/IROS.2008.4650722](https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650722).
- Illingworth, J. und J. Kittler (1988). „A survey of the hough transform“. In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 44.1, S. 87–116. ISSN: 0734189X. DOI: [10.1016/S0734-189X\(88\)80033-1](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(88)80033-1).

- Iron, American und Steel Institute (2024). „AISI 316L“. In: URL: <https://www.stahlportal.com/lagervorrat/14404-x2crnimo17-12-2-loesungsgeglueht-und-abgeschreckt/>.
- ISO/ASTM, DIN EN (2024). *DIN EN ISO/ASTM 52920:2023-12, Additive Fertigung_- Grundsätze der Qualifizierung_- Anforderungen an industrielle additive Fertigungsverfahren und Produktionsstätten (ISO/ASTM 52920:2023); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52920:2023*. Berlin. DOI: [10.31030/3481398](https://doi.org/10.31030/3481398).
- IVORRA MARTINEZ, JUAN et al. (2020). „EFFECT OF INFILL PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES IN ADDITIVE MANUFACTURING“. In: *DYNA* 95.1, S. 412–417. DOI: [10.6036/9674](https://doi.org/10.6036/9674).
- Jabalarneli, Amirhossein, Nabil Ettehadl und Aman Behal (2019). „Edge-Based Recognition of Novel Objects for Robotic Grasping“. In: *Robotics* 8.3, S. 63. ISSN: 2218-6581. DOI: [10.3390/robotics8030063](https://doi.org/10.3390/robotics8030063). URL: <http://arxiv.org/pdf/1802.08753v1>.
- Jiang, Yuewen (2020). „General mesh method: A unified numerical scheme“. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 369, S. 113049. ISSN: 00457825. DOI: [10.1016/j.cma.2020.113049](https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113049).
- Johnscher, Tina, Marcus Rauch und Tobias Zehnder (2020). *Technologieroadmap: Industrialisierung der Additiven Fertigung*. Bayern Innovativ.
- Jost, Timothée und Heinz Hügli (2002). „Fast ICP Algorithms for Shape Registration“. In: Springer, Berlin, Heidelberg, S. 91–99. DOI: [10.1007/3-540-45783-6_12](https://doi.org/10.1007/3-540-45783-6_12). URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45783-6_12.
- Kaiser, Benedikt (2009). *Bildverarbeitung für ein generisches Entladesystem*. DOI: [10.5445/IR/1000015610](https://doi.org/10.5445/IR/1000015610).
- Kim, Jaewoong et al. (2013). „Structured light camera base 3D visual perception and tracking application system with robot grasping task“. In: *2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*. IEEE, S. 187–192. ISBN: 978-1-4799-1657-3. DOI: [10.1109/ISAM.2013.6643524](https://doi.org/10.1109/ISAM.2013.6643524).
- Kleeberger, Kilian und Marco F. Huber (2020a). „Single Shot 6D Object Pose Estimation“. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, S. 6239–6245. ISBN: 978-1-7281-7395-5. DOI: [10.1109/ICRA40945.2020.9197207](https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197207).
- Kleeberger, Kilian et al. (2020b). „A Survey on Learning-Based Robotic Grasping“. In: *Current Robotics Reports* 1.4, S. 239–249. DOI: [10.1007/s43154-020-00021-6](https://doi.org/10.1007/s43154-020-00021-6).

- Kleeberger, Kilian et al. (2021a). *Automatic Grasp Pose Generation for Parallel Jaw Grippers*. URL: <http://arxiv.org/pdf/2104.11660v1>.
- (2021b). *Automatic Grasp Pose Generation for Parallel Jaw Grippers*. DOI: [10.48550/arXiv.2104.11660](https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.11660).
- Krznar, Nino, Ana Pilipović und Mladen Šercer (2016). „Additive Manufacturing of Fixture for Automated 3D Scanning – Case Study“. In: *Procedia Engineering* 149, S. 197–202. ISSN: 18777058. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.06.656](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.656).
- Kubus, Daniel, Torsten Kroger und Friedrich M. Wahl (2007). „On-line rigid object recognition and pose estimation based on inertial parameters“. In: *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 1402–1408. ISBN: 978-1-4244-0911-2. DOI: [10.1109/IROS.2007.4399184](https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399184).
- Kumar, Ajay et al. (2023). „Preprocessing and postprocessing in additive manufacturing“. In: *Advances in Additive Manufacturing Artificial Intelligence, Nature-Inspired, and Biomanufacturing*. Elsevier, S. 141–165. ISBN: 9780323918343. DOI: [10.1016/B978-0-323-91834-3.00005-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91834-3.00005-3).
- Kumar, Ashwath et al. (2017). „Effects of Hot Isostatic Pressing on Copper Parts Fabricated via Binder Jetting“. In: *Procedia Manufacturing* 10, S. 935–944. ISSN: 23519789. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.07.084](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.084).
- Kumar, Subodh et al. (2016). „A comparison of additive manufacturing technologies“. In: *Int. J. Innov. Res. Sci. Technol* 3, S. 147–152.
- Kumra, Sulabh und Christopher Kanan (2016). *Robotic Grasp Detection using Deep Convolutional Neural Networks*. DOI: [10.48550/arXiv.1611.08036](https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.08036).
- L. Sabharwal, Chaman und Jennifer L. Leopold (2015). „A Trianlge-Triangle Intersection Algorithm“. In: *Computer Science & Information Technology (CS & IT)*. Academy & Industry Research Collaboration Center (AIRCC), S. 27–35. ISBN: 9781921987380. DOI: [10.5121/csit.2015.51003](https://doi.org/10.5121/csit.2015.51003).
- Labuz, Joseph F. und Arno Zang (2015). „Mohr–Coulomb Failure Criterion“. In: *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Hrsg. von R. Ulusay. Cham: Springer International Publishing, S. 227–231. ISBN: 978-3-319-07712-3. DOI: [10.1007/978-3-319-07713-0\u20819](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0\u20819).
- Lachmayer, Roland, Rene bastian Lippert und Thomas Fahlbusch (2016). *3D-Druck beleuchtet*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-49055-6. DOI: [10.1007/978-3-662-49056-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49056-3).

- Latif, Kamran et al. (2021). „A review of G code, STEP, STEP-NC, and open architecture control technologies based embedded CNC systems“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 114.9-10, S. 2549–2566. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-021-06741-z](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06741-z).
- Lehmann, Maja et al. (2022). „Influence of the Pore Radius on the Penetration Depth of Inks in Binder Jetting—A Modification of the Washburn Equation“. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 6.5, S. 101. DOI: [10.3390/jmmp6050101](https://doi.org/10.3390/jmmp6050101).
- Lei, Qujiang und Martijn Wisse (2016). „Object grasping by combining caging and force closure“. In: *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–8. ISBN: 978-1-5090-3549-6. DOI: [10.1109/ICARCV.2016.7838638](https://doi.org/10.1109/ICARCV.2016.7838638).
- (2017). „Fast grasping of unknown objects using cylinder searching on a single point cloud“. In: *Ninth International Conference on Machine Vision (ICMV 2016)*. Hrsg. von Antanas Verikas et al. SPIE Proceedings. SPIE, S. 1034108. DOI: [10.1117/12.2268422](https://doi.org/10.1117/12.2268422).
- León, Beatriz et al. (2010). „OpenGRASP: A Toolkit for Robot Grasping Simulation“. In: *Simulation, modeling, and programming for autonomous robots*. Hrsg. von Noriaki Andō. Bd. 6472. Lecture notes in computer science Lecture notes in artificial intelligence. Berlin und Heidelberg: Springer, S. 109–120. ISBN: 978-3-642-17318-9. DOI: [10.1007/978-3-642-17319-6\textunderscore13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17319-6\textunderscore13).
- Li, Haolin et al. (2019). „Finite Element Modeling of Porous Microstructures With Random Holes of Different-Shapes and -Sizes to Predict Their Effective Elastic Behavior“. In: *Applied Sciences* 9.21, S. 4536. DOI: [10.3390/app9214536](https://doi.org/10.3390/app9214536).
- Li, Lujuan et al. (2021). „Water governs the mechanical properties of poly(vinyl alcohol)“. In: *Polymer* 213, S. 123330. ISSN: 00323861. DOI: [10.1016/j.polymer.2020.123330](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123330).
- Li, Ming et al. (2020). „Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review“. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 142.9. ISSN: 1087-1357. DOI: [10.1115/1.4047430](https://doi.org/10.1115/1.4047430).
- Li, Ying und N. S. Pollard (2005). „A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasps“. In: *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005*. IEEE, S. 442–449. ISBN: 0-7803-9320-1. DOI: [10.1109/ICHR.2005.1573607](https://doi.org/10.1109/ICHR.2005.1573607).
- Li, Zexiang und S. Sastry (March 1987). „Task oriented optimal grasping by multifingered robot hands“. In: *Proceedings. 1987 IEEE International Conference*

- on *Robotics and Automation*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 389–394. DOI: [10.1109/ROBOT.1987.1087852](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1987.1087852).
- Lien, Jyh-Ming und Nancy M. Amato (2006). „Approximate convex decomposition of polygons“. In: *Computational Geometry* 35.1-2, S. 100–123. ISSN: 09257721. DOI: [10.1016/j.comgeo.2005.10.005](https://doi.org/10.1016/j.comgeo.2005.10.005).
- Liesen, Jörg und Volker Mehrmann (2015). *Lineare Algebra*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-06609-3. DOI: [10.1007/978-3-658-06610-9](https://doi.org/10.1007/978-3-658-06610-9).
- Lillicrap, Timothy P. et al. (2015). *Continuous control with deep reinforcement learning*. DOI: [10.48550/arXiv.1509.02971](https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.02971).
- Lin, Yu-Chi, Shao-Ting Wei und Li-Chen Fu (2014). „Grasping unknown objects using depth gradient feature with eye-in-hand RGB-D sensor“. In: *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, S. 1258–1263. ISBN: 978-1-4799-5283-0. DOI: [10.1109/CoASE.2014.6899488](https://doi.org/10.1109/CoASE.2014.6899488).
- Lin, Yun und Yu Sun (2016). „Task-Oriented Grasp Planning Based on Disturbance Distribution“. In: *Robotics research*. Hrsg. von Masayuki Inaba und Peter I. Corke. Bd. 114. Springer Tracts in Advanced Robotics. Cham: Springer, S. 577–592. ISBN: 978-3-319-28870-3. DOI: [10.1007/978-3-319-28872-7_textunderscore33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28872-7_textunderscore33).
- Lippiello, Vincenzo et al. (2013). „Visual Grasp Planning for Unknown Objects Using a Multifingered Robotic Hand“. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 18.3, S. 1050–1059. ISSN: 1083-4435. DOI: [10.1109/TMECH.2012.2195500](https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2195500).
- Liu, Shuo und Stefano Carpin (2015). „A fast algorithm for grasp quality evaluation using the object wrench space“. In: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2015)*. Hrsg. von Qing-Shan Jia. Piscataway, NJ: IEEE, S. 558–563. ISBN: 978-1-4673-8183-3. DOI: [10.1109/CoASE.2015.7294138](https://doi.org/10.1109/CoASE.2015.7294138).
- Liu, Zhenwei et al. (2022). „Robotic Depowdering for Additive Manufacturing Via Pose Tracking“. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 7.4, S. 10770–10777. ISSN: 2377-3766. DOI: [10.1109/LRA.2022.3195189](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3195189). URL: <http://arxiv.org/pdf/2207.04196v2>.
- Lopez-Damian, Efrain, Daniel Sidobre und Rachid Alami (2005). „A Grasp Planner Based On Inertial Properties: Barcelona, Spain, 18 - 22 April 2005“. In: *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- Lores, Asier et al. (2019). „A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics“. In: *Powder Metallurgy* 62.5, S. 267–296. ISSN: 0032-5899. DOI: [10.1080/00325899.2019.1669299](https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1669299).

- Mahler, Jeffrey et al. (2017). „Dex-Net 2.0: Deep Learning to Plan Robust Grasps with Synthetic Point Clouds and Analytic Grasp Metrics“. In: *Robotics: Science and Systems XIII*. Robotics: Science and Systems Foundation. ISBN: 978-0-9923747-3-0. DOI: [10.15607/RSS.2017.XIII.058](https://doi.org/10.15607/RSS.2017.XIII.058).
- Makoviychuk, Viktor et al. (2021). *Isaac Gym: High Performance GPU-Based Physics Simulation For Robot Learning*. DOI: [10.48550/arXiv.2108.10470](https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.10470).
- Mao, Yiwei et al. (2021). „Binder jetting additive manufacturing of 316L stainless-steel green parts with high strength and low binder content: Binder preparation and process optimization“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 291, S. 117020. ISSN: 09240136. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2020.117020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117020).
- Mariani, Marco et al. (Okt. 2020). „Effect of printing parameters on the mechanical strength of green body from binder jetting additive manufacturing“. In:
- Matei, Bogdan et al. (2006). „Rapid object indexing using locality sensitive hashing and joint 3D-signature space estimation“. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 28.7, S. 1111–1126. ISSN: 0162-8828. DOI: [10.1109/TPAMI.2006.148](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.148).
- Meagher, Donald (1982). „Geometric modeling using octree encoding“. In: *Computer Graphics and Image Processing* 19.2, S. 129–147. ISSN: 0146664X. DOI: [10.1016/0146-664X\(82\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90104-6).
- Mian, Ajmal S., Mohammed Bennamoun und Robyn Owens (2006). „Three-dimensional model-based object recognition and segmentation in cluttered scenes“. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 28.10, S. 1584–1601. ISSN: 0162-8828. DOI: [10.1109/TPAMI.2006.213](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.213).
- Miller, A. T. und P. K. Allen (2004). „GraspIt!“ In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 11.4, S. 110–122. ISSN: 1070-9932. DOI: [10.1109/MRA.2004.1371616](https://doi.org/10.1109/MRA.2004.1371616).
- Miller, A. T. et al. (2003). „Automatic grasp planning using shape primitives“. In: *Proceedings / 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 1824–1829. ISBN: 0-7803-7736-2. DOI: [10.1109/ROBOT.2003.1241860](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241860).
- Mirzababaei, Saereh und Somayeh Pasebani (2019). „A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel“. In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3.3, S. 82. DOI: [10.3390/jmmp3030082](https://doi.org/10.3390/jmmp3030082).
- Miyanaaji, Hadi, Shanshan Zhang und Li Yang (2018). „A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing

- process“. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 124, S. 1–11. ISSN: 08906955. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2017.09.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.09.001).
- Miyanaaji, Hadi et al. (2020). „Effect of fine powder particles on quality of binder jetting parts“. In: *Additive Manufacturing* 36, S. 101587. ISSN: 22148604. DOI: [10.1016/j.addma.2020.101587](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101587).
- Mori, T. und K. Tanaka (1973). „Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions“. In: *Acta Metallurgica* 21.5, S. 571–574. ISSN: 00016160. DOI: [10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3).
- Mostafaei, Amir et al. (2021). „Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges“. In: *Progress in Materials Science* 119, S. 100707. ISSN: 00796425. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2020.100707](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707).
- Mu, Nan et al. (2018). „Salient object detection using a covariance-based CNN model in low-contrast images“. In: *Neural Computing and Applications* 29.8, S. 181–192. ISSN: 0941-0643. DOI: [10.1007/s00521-017-2870-6](https://doi.org/10.1007/s00521-017-2870-6).
- Nemat-Nasser, S., G. Æ. Oravas und Toshio Mura (1987). *Micromechanics of defects in solids*. Bd. 3. Dordrecht: Springer Netherlands. ISBN: 978-90-247-3256-2. DOI: [10.1007/978-94-009-3489-4](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3489-4).
- Newman, Timothy S. und Hong Yi (2006). „A survey of the marching cubes algorithm“. In: *Computers & Graphics* 30.5, S. 854–879. ISSN: 00978493. DOI: [10.1016/j.cag.2006.07.021](https://doi.org/10.1016/j.cag.2006.07.021).
- Nguyen, V.-D. (April 1986). „Constructing force-closure grasps“. In: *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 1368–1373. DOI: [10.1109/ROBOT.1986.1087483](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1986.1087483).
- (March 1987). „Constructing stable grasps in 3D“. In: *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 234–239. DOI: [10.1109/ROBOT.1987.1088008](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1987.1088008).
- Niemann, Gustav et al. (2019). *Maschinenelemente 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Springer eBook Collection. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-55482-1. DOI: [10.1007/978-3-662-55482-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55482-1).
- Nieuwenhuisen, Matthias et al. (2012). *Shape-Primitive Based Object Recognition and Grasping*. Berlin: VDE Verlag.
- Oh, Ji-Won et al. (2019). „Anisotropy in Green Body Bending Strength due to Additive Direction in the Binder-Jetting Additive Manufacturing Process“. In:

- Korean Journal of Metals and Materials* 57.4, S. 227–235. ISSN: 1738-8228. DOI: [10.3365/KJMM.2019.57.4.227](https://doi.org/10.3365/KJMM.2019.57.4.227).
- Onat, Burcu et al. (2020). „Assessment of the health risk related to exposure to ultrafine, fine, and total particulates and metals in a metal finishing plant“. In: *Environmental science and pollution research international* 27.4, S. 4058–4066. DOI: [10.1007/s11356-019-06891-4](https://doi.org/10.1007/s11356-019-06891-4).
- Orsula, Andrej et al. (2022). „Learning to Grasp on the Moon from 3D Octree Observations with Deep Reinforcement Learning“. In: *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, S. 4112–4119. DOI: [10.1109/IROS47612.2022.9981661](https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981661).
- Osada, Robert et al. (Okt. 2002). „Shape Distributions“. In: *ACM Transactions on Graphics* 21.4, S. 807–832.
- Ovcharenko, Aleksandr et al. (2013). „Parallel Adaptive Boundary Layer Meshing for CFD Analysis“. In: *Proceedings of the 21st International Meshing Roundtable*. Hrsg. von Xiangmin Jiao und Jean-Christophe Weill. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 437–455. ISBN: 978-3-642-33572-3. DOI: [10.1007/978-3-642-33573-0{\textunderscore}26](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33573-0{\textunderscore}26).
- Ozkan, Dervis et al. (2024). „Recent Developments in Additive Manufacturing“. In: *Practical Implementations of Additive Manufacturing Technologies*. Hrsg. von Shashanka Rajendrachari. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. Singapore: Springer Nature Singapore, S. 1–21. ISBN: 978-981-99-5948-8. DOI: [10.1007/978-981-99-5949-5{\textunderscore}1](https://doi.org/10.1007/978-981-99-5949-5{\textunderscore}1).
- Pan, Zherong, Xifeng Gao und Dinesh Manocha (2020). „Grasping Fragile Objects Using A Stress-Minimization Metric“. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, S. 517–523. ISBN: 978-1-7281-7395-5. DOI: [10.1109/ICRA40945.2020.9196938](https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196938).
- Papazov, Chavdar et al. (2012). „Rigid 3D geometry matching for grasping of known objects in cluttered scenes“. In: *The International Journal of Robotics Research* 31.4, S. 538–553. ISSN: 0278-3649. DOI: [10.1177/0278364911436019](https://doi.org/10.1177/0278364911436019).
- Parab, Niranjana D. et al. (2019). „Real time observation of binder jetting printing process using high-speed X-ray imaging“. In: *Scientific reports* 9.1, S. 2499. DOI: [10.1038/s41598-019-38862-7](https://doi.org/10.1038/s41598-019-38862-7).
- Park, Chanhun et al. (2011). „Development of direct teaching robot system“. In: *2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*

- (URAI). IEEE, S. 730–732. ISBN: 978-1-4577-0723-0. DOI: [10.1109/URAI.2011.6145921](https://doi.org/10.1109/URAI.2011.6145921).
- Parnell, William J. (2016). „The Eshelby, Hill, Moment and Concentration Tensors for Ellipsoidal Inhomogeneities in the Newtonian Potential Problem and Linear Elastostatics“. In: *Journal of Elasticity* 125.2, S. 231–294. ISSN: 0374-3535. DOI: [10.1007/s10659-016-9573-6](https://doi.org/10.1007/s10659-016-9573-6).
- Pas, Andreas ten und Robert Platt (2015). *Using Geometry to Detect Grasps in 3D Point Clouds*. URL: <http://arxiv.org/pdf/1501.03100v3>.
- Pedrazzoli, P., R. Rinaldi und C. R. Boer (2001). „A rule based approach to the gripper selection issue for the assembly process“. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001)*. Piscataway, NJ: IEEE Operation Center, S. 202–207. ISBN: 0-7803-7004-X. DOI: [10.1109/ISATP.2001.928990](https://doi.org/10.1109/ISATP.2001.928990).
- Pei, Eujin et al. (2023). *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-031-20751-8. DOI: [10.1007/978-3-031-20752-5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5).
- Pelossof, R. et al. (2004). „An SVM learning approach to robotic grasping“. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*. IEEE, 3512–3518 Vol.4. ISBN: 0-7803-8232-3. DOI: [10.1109/ROBOT.2004.1308797](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1308797).
- Pereira, S., A. I. F. Vaz und L. N. Vicente (2018). „On the optimal object orientation in additive manufacturing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 98.5-8, S. 1685–1694. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-018-2218-0](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2218-0).
- Pérez, Mercedes et al. (2020). „Current advances in additive manufacturing“. In: *Procedia CIRP* 88, S. 439–444. ISSN: 22128271. DOI: [10.1016/j.procir.2020.05.076](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.076).
- Philipp Lechner (2021). *A Material Model for Foundry Cores*. DOI: [10.14459/2021md1635091](https://doi.org/10.14459/2021md1635091).
- Pokorny, Florian T., Johannes A. Stork und Danica Kragic (2013). „Grasping objects with holes: A topological approach“. In: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1100–1107. ISBN: 978-1-4673-5643-5. DOI: [10.1109/ICRA.2013.6630710](https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630710).
- Pollard, Nancy S. (1994). „Parallel methods for synthesizing whole-hand grasps from generalized prototypes“. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.17.4091&rep=rep1&type=pdf>.

- Praveena, B.A. et al. (2022). „A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential“. In: *Materials Today: Proceedings* 52, S. 1309–1313. ISSN: 22147853. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.11.059](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.059).
- Przybylski, Markus et al. (2012). „A skeleton-based approach to grasp known objects with a humanoid robot“. In: *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 376–383. ISBN: 978-1-4673-1369-8. DOI: [10.1109/HUMANOIDS.2012.6651547](https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2012.6651547).
- Qi, Charles R. et al. (2016). *PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation*. DOI: [10.48550/arXiv.1612.00593](https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.00593).
- Quillen, Deirdre et al. (2018). *Deep Reinforcement Learning for Vision-Based Robotic Grasping: A Simulated Comparative Evaluation of Off-Policy Methods*. URL: <http://arxiv.org/pdf/1802.10264v2>.
- Rao, D. et al. (2010). „Grasping novel objects with depth segmentation“. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 2578–2585. ISBN: 978-1-4244-6674-0. DOI: [10.1109/IROS.2010.5650493](https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650493).
- Rebecq, Henri, Guillermo Gallego und Davide Scaramuzza (2016). „EMVS: Event-based Multi-View Stereo“. In: *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2016*. Hrsg. von R. C. Wilson et al. British Machine Vision Association, S. 63.1–63.11. ISBN: 1-901725-59-6. DOI: [10.5244/C.30.63](https://doi.org/10.5244/C.30.63).
- Redmon, Joseph und Anelia Angelova (2015). „Real-time grasp detection using convolutional neural networks“. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, S. 1316–1322. ISBN: 978-1-4799-6923-4. DOI: [10.1109/ICRA.2015.7139361](https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139361).
- Reinhart, Gunther, Alejandro Magaña Flores und Carola Zwicker (2018). *Industrieroboter: Planung, Integration, Trends : ein Leitfaden für die KMU*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Communications Group. ISBN: 978-3-8343-3401-5.
- Richtsfeld, Mario und Markus Vincze (2011). „Robotic Grasping of Unknown Objects“. In: *Robot Arms*. Hrsg. von Satoru Goto. Erscheinungsort nicht ermittelbar: IntechOpen. ISBN: 978-953-307-160-2. DOI: [10.5772/16799](https://doi.org/10.5772/16799).
- Riedl, Michael und Dominik Henrich (2019). „A Fast Robot Playback Programming System Using Video Editing Concepts“. In: *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Hrsg. von Thorsten Schüppstuhl, Kirsten Tracht und Jürgen Roßmann. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin

- Heidelberg, S. 259–268. ISBN: 978-3-662-59316-5. DOI: [10.1007/978-3-662-59317-2\u20826](https://doi.org/10.1007/978-3-662-59317-2\u20826).
- Rishmawi, Issa, Mehrnaz Salarian und Mihaela Vlasea (2018). „Tailoring green and sintered density of pure iron parts using binder jetting additive manufacturing“. In: *Additive Manufacturing* 24, S. 508–520. ISSN: 22148604. DOI: [10.1016/j.addma.2018.10.015](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.015).
- Roa, Máximo A. und Raúl Suárez (2015). „Grasp quality measures: review and performance“. In: *Autonomous robots* 38.1, S. 65–88. ISSN: 0929-5593. DOI: [10.1007/s10514-014-9402-3](https://doi.org/10.1007/s10514-014-9402-3).
- Rösler, Joachim, Harald Harders und Martin Bäker (2012). *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-1818-8. DOI: [10.1007/978-3-8348-2241-3](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2241-3).
- Rozenberg, Grzegorz, Thomas Bäck und Joost N. Kok, Hrsg. (2012). *Handbook of Natural Computing*. SpringerLink Bücher. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 9783540929109. DOI: [10.1007/978-3-540-92910-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92910-9).
- Rubert, Carlos et al. (2018). „Characterisation of Grasp Quality Metrics“. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 89.3-4, S. 319–342. ISSN: 0921-0296. DOI: [10.1007/s10846-017-0562-1](https://doi.org/10.1007/s10846-017-0562-1).
- Rusinkiewicz, S. und M. Levoy (2001). „Efficient variants of the ICP algorithm“. In: *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. IEEE Comput. Soc, S. 145–152. ISBN: 0-7695-0984-3. DOI: [10.1109/IM.2001.924423](https://doi.org/10.1109/IM.2001.924423).
- Sainul, I. A., Sankha Deb und A. K. Deb (2019). *A novel object slicing based grasp planner for 3D object grasping using underactuated robot gripper*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1907.09142>.
- Saut, Jean-Philippe und Daniel Sidobre (2012). „Efficient models for grasp planning with a multi-fingered hand“. In: *Robotics and Autonomous Systems* 60.3, S. 347–357. ISSN: 09218890. DOI: [10.1016/j.robot.2011.07.019](https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.07.019).
- Savio, G. et al. (2019). „3D Model Representation and Data Exchange for Additive Manufacturing“. In: *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II*. Hrsg. von Francisco Cavas-Martínez et al. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing, S. 412–421. ISBN: 978-3-030-12345-1. DOI: [10.1007/978-3-030-12346-8\u20840](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8\u20840).
- Schittkowski, K. (1987). „Solving Constrained Nonlinear Least Squares Problems by a General Purpose SQP-Method“. In: *Trends in Mathematical Optimization*.

- Hrsg. von Karl-Heinz Hoffmann et al. Basel: Birkhäuser Basel, S. 295–309. ISBN: 978-3-0348-9984-0. DOI: [10.1007/978-3-0348-9297-1](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9297-1)
- Schlick, Jochen et al. (2014). „Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung“. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Hrsg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 57–84. ISBN: 978-3-658-04681-1. DOI: [10.1007/978-3-658-04682-8](https://doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8)
- Schmalz, Johannes et al. (2016). „Method for the Automated Dimensioning of Gripper Systems“. In: *Procedia CIRP* 44, S. 239–244. ISSN: 22128271. DOI: [10.1016/j.procir.2016.02.106](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.106)
- Schmalz, Johannes Karl Bernhard (2018). „Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen“. Dissertation. München: Technische Universität München.
- Schnabel, R., R. Wahl und R. Klein (2007). „Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection“. In: *Computer Graphics Forum* 26.2, S. 214–226. ISSN: 01677055. DOI: [10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x)
- Schroeder, William J., Ken Martin und William E. Lorensen (2006). *The visualization toolkit: An object-oriented approach to 3D graphics ; [visualize data in 3D - medical, engineering or scientific ; build your own applications with C++, Tcl, Java or Python ; includes source code for VTK (supports UNIX, Windows and Mac)*. 4. ed. Clifton Park, NY: Kitware. ISBN: 978-1-930934-19-1.
- Schrott, Anneliese, Hrsg. (1992). *Future-based camera guided grasping by an eye-in-hand robot*. ISBN: 0-8186-2720-4.
- SCHUNK (2024). „Schunk Co-Act-EGP-C-40“. In: URL: <https://schunk.com/de/de>
- Si, Hang (2015). „TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator“. In: *ACM Transactions on Mathematical Software* 41.2, S. 1–36. ISSN: 0098-3500. DOI: [10.1145/2629697](https://doi.org/10.1145/2629697)
- Smith, G. et al. (1999). „Computing parallel-jaw grips“. In: *Proceedings / 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 1897–1903. ISBN: 0-7803-5180-0. DOI: [10.1109/ROBOT.1999.770385](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1999.770385)
- Smith, Michael (2014). *ABAQUS theory manual, Version 6.14*. English. United States: Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Souza, João Pedro Carvalho de et al. (2021). „Robotic grasping: from wrench space heuristics to deep learning policies“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 71, S. 102176. ISSN: 07365845. DOI: [10.1016/j.rcim.2021.102176](https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102176)

- Spenrath, Felix und Andreas Pott (2017). „Gripping Point Determination for Bin Picking Using Heuristic Search“. In: *Procedia CIRP* 62, S. 606–611. ISSN: 22128271. DOI: [10.1016/j.procir.2016.06.015](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.015).
- Stojanović, Biljana D., Hrsg. (1999). *Advanced Science and Technology of Sintering*. Boston, MA: Springer. ISBN: 9781461346616. DOI: [10.1007/978-1-4419-8666-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8666-5).
- Straßer, Gerhard (2012). *Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011*. Bd. 256. Forschungsberichte / IWB. München: Utz. ISBN: 978-3-8316-4161-1.
- Stroud, I. und P. C. Xirouchakis (2000). „STL and extensions“. In: *Advances in Engineering Software* 31.2, S. 83–95. ISSN: 09659978. DOI: [10.1016/S0965-9978\(99\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(99)00046-0).
- Sun, Jian, Maks Ovsjanikov und Leonidas Guibas (2009). „A Concise and Provably Informative Multi-Scale Signature Based on Heat Diffusion“. In: *Computer Graphics Forum* 28.5, S. 1383–1392. ISSN: 01677055. DOI: [10.1111/j.1467-8659.2009.01515.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01515.x).
- Süße, Herbert und Erik Rodner (2014). *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN: 978-3834826053. DOI: [10.1007/978-3-8348-2606-0](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2606-0).
- Sutherland, Ivan E. und Gary W. Hodgman (1974a). „Reentrant polygon clipping“. In: *Communications of the ACM* 17.1, S. 32–42. ISSN: 0001-0782. DOI: [10.1145/360767.360802](https://doi.org/10.1145/360767.360802).
- Sutherland, Ivan E., Robert F. Sproull und Robert A. Schumacker (1974b). „A Characterization of Ten Hidden-Surface Algorithms“. In: *ACM Computing Surveys* 6.1, S. 1–55. ISSN: 0360-0300. DOI: [10.1145/356625.356626](https://doi.org/10.1145/356625.356626).
- Sutton, Richard S. und Andrew Barto (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. A Bradford book. Cambridge, Massachusetts und London: The MIT Press. ISBN: 978-0262193986.
- Szegedy, Christian et al. (2015). „Going deeper with convolutions“. In: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE, S. 1–9. ISBN: 978-1-4673-6964-0. DOI: [10.1109/CVPR.2015.7298594](https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594).
- Szilvsi-Nagy, M. und Gy. Mátyási (2003). „Analysis of STL files“. In: *Mathematical and Computer Modelling* 38.7-9, S. 945–960. ISSN: 08957177. DOI: [10.1016/S0895-7177\(03\)90079-3](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)90079-3).

- Tao, Fei et al. (2022). „Digital twin modeling“. In: *Journal of Manufacturing Systems* 64, S. 372–389. ISSN: 02786125. DOI: [10.1016/j.jmsy.2022.06.015](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015).
- Tenney, Charles M. et al. (2018). „Traveling Waves As a De-Powdering Process for Additively Manufactured Parts“. In: *Volume 1: Development and Characterization of Multifunctional Materials; Modeling, Simulation, and Control of Adaptive Systems; Integrated System Design and Implementation*. American Society of Mechanical Engineers. ISBN: 978-0-7918-5194-4. DOI: [10.1115/SMASIS2018-8189](https://doi.org/10.1115/SMASIS2018-8189).
- Thingiverse (2023). URL: <https://www.thingiverse.com/>.
- Tristano, Joseph R. et al. (2003). „Fully Automatic Adaptive Mesh Refinement Integrated into the Solution Process“. In: *International Meshing Roundtable Conference*.
- Ueng, Shyh-Kuang, Lu-Guan Chen und Szu-Yao Jen (2018). „Voxel-based virtual manufacturing simulation for three-dimensional printing“. In: *Advances in Mechanical Engineering* 10.6, S. 168781401878163. ISSN: 1687-8140. DOI: [10.1177/1687814018781632](https://doi.org/10.1177/1687814018781632).
- University, Cornell (2022). *Learning to Grasp*. URL: http://pr.cs.cornell.edu/grasping/rect_data/data.php.
- Vahrenkamp, Nikolaus et al. (2017). *Planning High-Quality Grasps using Mean Curvature Object Skeletons*. URL: <http://arxiv.org/pdf/1710.02418v1>.
- van Nguyen, Nguyen et al. (2022). *Templates for 3D Object Pose Estimation Revisited: Generalization to New Objects and Robustness to Occlusions*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2203.17234>.
- Vatti, Bala R. (1992). „A generic solution to polygon clipping“. In: *Communications of the ACM* 35.7, S. 56–63. ISSN: 0001-0782. DOI: [10.1145/129902.129906](https://doi.org/10.1145/129902.129906).
- Vogt, Ludwig und Johannes Schilp (2022a). „Finite Element based Compression and Volumetric Load Analysis for Grasped Objects“. In: *2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*. IEEE, S. 1–6. ISBN: 978-1-6654-7095-7. DOI: [10.1109/ICECCME55909.2022.9987947](https://doi.org/10.1109/ICECCME55909.2022.9987947).
- Vogt, Ludwig, Yannick Zimmermann und Johannes Schilp (2022b). „Computing Gripping Points in 2D Parallel Surfaces Via Polygon Clipping“. In: *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*. Hrsg. von Thorsten Schüppstuhl, Kirsten Tracht und Annika Raatz. Cham: Springer International Publishing, S. 101–112. ISBN: 978-3-030-74031-3. DOI: [10.1007/978-3-030-74032-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74032-0_9).

- Voigt, W. (1889). „Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper“. In: *Annalen der Physik* 274.12, S. 573–587. ISSN: 00033804. DOI: [10.1002/andp.18892741206](https://doi.org/10.1002/andp.18892741206).
- Wan, Weiwei, Kensuke Harada und Fumio Kanehiro (2019). *Planning Grasps for Assembly Tasks*. URL: <http://arxiv.org/pdf/1903.01631v1>.
- Wang, Rongxuan et al. (2021). „Development of structured light 3D-scanner with high spatial resolution and its applications for additive manufacturing quality assurance“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 117.3-4, S. 845–862. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-021-07780-2](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07780-2).
- Wang, Ying et al. (2014). „A modified image-based visual servo controller with hybrid camera configuration for robust robotic grasping“. In: *Robotics and Autonomous Systems* 62.10, S. 1398–1407. ISSN: 09218890. DOI: [10.1016/j.robot.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.06.003).
- Watkins, Christopher J. C. H. und Peter Dayan (1992). „Q-learning“. In: *Machine Learning* 8.3-4, S. 279–292. ISSN: 0885-6125. DOI: [10.1007/BF00992698](https://doi.org/10.1007/BF00992698).
- Weiler, Kevin und Peter Atherton (1977). „Hidden surface removal using polygon area sorting“. In: *Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '77*. Hrsg. von Unknown. New York, New York, USA: ACM Press, S. 214–222. DOI: [10.1145/563858.563896](https://doi.org/10.1145/563858.563896).
- Wiedholz, Andreas et al. (2021). „CAD-based Grasp and Motion Planning for Process Automation in Fused Deposition Modelling“. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, S. 450–458. ISBN: 978-989-758-522-7. DOI: [10.5220/0010571204500458](https://doi.org/10.5220/0010571204500458).
- Winkelbach, Simon, Sven Molkenstruck und Friedrich M. Wahl (2006). „Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach“. In: *Pattern recognition*. Hrsg. von David Hutchison et al. Bd. 4174. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, S. 718–728. ISBN: 978-3-540-44412-1. DOI: [10.1007/11861898_72](https://doi.org/10.1007/11861898_72).
- Wollbrink, Moritz und Sebastian Hähnel (2020a). „Additiv-Bauteile in der Fertigung - eine ganzheitliche Betrachtung“. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 60.11, S. 52–53. ISSN: 0940-8789. DOI: [10.1007/s35144-020-0995-3](https://doi.org/10.1007/s35144-020-0995-3).
- Wollbrink, Moritz et al. (2020b). „Clamping and substrate plate system for continuous additive build-up and post-processing of metal parts“. In: *Procedia CIRP* 93, S. 108–113. ISSN: 22128271. DOI: [10.1016/j.procir.2020.04.015](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.015).

- Wu, Huai-Yu et al. (2010). „Global and local isometry-invariant descriptor for 3D shape comparison and partial matching“. In: *2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 438–445. ISBN: 978-1-4244-6984-0. DOI: [10.1109/CVPR.2010.5540180](https://doi.org/10.1109/CVPR.2010.5540180).
- Wu, Yuwei et al. (2023). *Learning-Free Grasping of Unknown Objects Using Hidden Superquadrics*. DOI: [10.48550/arXiv.2305.06591](https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.06591).
- Yamazaki, Kimitoshi, Masahiro Tomono und Takashi Tsubouchi (2008). „Picking up an Unknown Object through Autonomous Modeling and Grasp Planning by a Mobile Manipulator“. In: *Field and service robotics*. Hrsg. von Christian Laugier und Roland Siegwart. Bd. 42. Springer Tracts in Advanced Robotics. Berlin: Springer, S. 563–571. ISBN: 978-3-540-75403-9. DOI: [10.1007/978-3-540-75404-6_54](https://doi.org/10.1007/978-3-540-75404-6_54).
- Yanamandra, Kaushik et al. (2020). „Reverse engineering of additive manufactured composite part by toolpath reconstruction using imaging and machine learning“. In: *Composites Science and Technology* 198, S. 108318. ISSN: 02663538. DOI: [10.1016/j.compscitech.2020.108318](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108318).
- Yanez-Sanchez, Sergio I et al. (2021). „Model approach for binder selection in binder jetting“. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 60.42, S. 15162–15173.
- Yang, Honghui et al. (2022). *Graph R-CNN: Towards Accurate 3D Object Detection with Semantic-Decorated Local Graph*. DOI: [10.48550/arXiv.2208.03624](https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.03624).
- Yau, Hong-Tzong und Che-Wei Hsu (2022). „Nesting of 3D irregular shaped objects applied to powder-based additive manufacturing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 118.5-6, S. 1843–1858. ISSN: 0268-3768. DOI: [10.1007/s00170-021-07954-y](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07954-y).
- Yegyan Kumar, Ashwath et al. (2019). „Impacts of process-induced porosity on material properties of copper made by binder jetting additive manufacturing“. In: *Materials & Design* 182, S. 108001. ISSN: 02641275. DOI: [10.1016/j.matdes.2019.108001](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108001).
- Yun, Bai und Christopher B. Williams (2017). „Binderless Jetting: Additive Manufacturing of metal parts via jetting nanoparticles“. In: *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Bd. 28. URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/89818>.
- Zago, Marco et al. (2021). „Dimensional and geometrical precision of parts produced by binder jetting process as affected by the anisotropic shrinkage on sintering“. In:

- Additive Manufacturing* 43, S. 102007. ISSN: 22148604. DOI: [10.1016/j.addma.2021.102007](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102007).
- Zaidi, Lazher et al. (2017). „Model-based strategy for grasping 3D deformable objects using a multi-fingered robotic hand“. In: *Robotics and Autonomous Systems* 95, S. 196–206. ISSN: 09218890. DOI: [10.1016/j.robot.2017.06.011](https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.06.011).
- Zeng Wang, Dominic und Ingmar Posner (2015). „Voting for Voting in Online Point Cloud Object Detection“. In: *Robotics: Science and Systems XI*. Hrsg. von Lydia E. Kavraki, David Hsu und Jonas Buchli. Berlin?: Robotics Science and Systems Foundation. ISBN: 9780992374716. DOI: [10.15607/RSS.2015.XI.035](https://doi.org/10.15607/RSS.2015.XI.035).
- Zhang, Jiahao et al. (2020). „Robotic grasp detection based on image processing and random forest“. In: *Multimedia Tools and Applications* 79.3-4, S. 2427–2446. ISSN: 1380-7501. DOI: [10.1007/s11042-019-08302-9](https://doi.org/10.1007/s11042-019-08302-9).
- Zhang, Jiayi Eris, Alec Jacobson und Marc Alexa (2021a). „Fast Updates for Least-Squares Rotational Alignment“. In: *Computer Graphics Forum* 40.2, S. 13–22. ISSN: 01677055. DOI: [10.1111/cgf.142611](https://doi.org/10.1111/cgf.142611).
- Zhang, Ying und Chen Ling (2018). „A strategy to apply machine learning to small datasets in materials science“. In: *npj Computational Materials* 4.1. DOI: [10.1038/s41524-018-0081-z](https://doi.org/10.1038/s41524-018-0081-z).
- Zhang, Ying und Xin Shi (2014). „Research on the Three-Dimensional Displaying of STL ASCII and Binary File“. In: *Advanced Materials Research* 940, S. 433–436. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.940.433](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.940.433).
- Zhang, Zhao-fa et al. (2021b). „Binder jetting 3D printing process optimization for rapid casting of green parts with high tensile strength“. In: *China Foundry* 18.4, S. 335–343. ISSN: 1672-6421. DOI: [10.1007/s41230-021-1057-z](https://doi.org/10.1007/s41230-021-1057-z).
- Zhang, Zhengyou (2014). „Iterative Closest Point (ICP)“. In: *Computer Vision*. Hrsg. von Katsushi Ikeuchi. Boston, MA: Springer US, S. 433–434. ISBN: 978-0-387-30771-8. DOI: [10.1007/978-0-387-31439-6_179](https://doi.org/10.1007/978-0-387-31439-6_179).
- Zhou, Yuhaowei et al. (2015). „The Verification of the Mechanical Properties of Binder Jetting Manufactured Parts by Instrumented Indentation Testing“. In: *Procedia Manufacturing* 1, S. 327–342. ISSN: 23519789. DOI: [10.1016/j.promfg.2015.09.038](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.038).
- Ziaee, Mohsen und Nathan B. Crane (2019). „Binder jetting: A review of process, materials, and methods“. In: *Additive Manufacturing* 28, S. 781–801. ISSN: 22148604. DOI: [10.1016/j.addma.2019.05.031](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031).

A. Anhang

A.1. Verwendete Grenzwerte in den mathematischen Modellen

Tabelle A.1.: Eingestellte Parameter für die Ausführung der individuellen Module.

Symbol	Beschreibung	Wert
α_{grenz}	Grenzwert für die Winkeldifferenz	2°
A_{grenz}	Grenzwert für den Flächenabgleich beim Polygon Clipping	100 %
$\Delta x, \Delta y$	Diskretisierung für die Überprüfung potentieller Punktkontakte	5 mm
d_{grenz}	Grenzwert für den Abstand zweier Punkte	10 mm
d_{offset}	Inkrementelle Verschiebung der Wirkfläche	5 mm
d_{shift}	Verschiebung des Hilfspunktes zur Klassifizierung konvexer/konkaver Stellen	1 mm
d_{min}, d_{max}	Arbeitsraum des Greifers	[0 mm, 20 mm]
h_K	Höhe des aufgespannten Kegels im Digitalen Zwilling	50 mm
D_K	Durchmesser des aufgespannten Kegels im Digitalen Zwilling	40 mm
n	Anzahl der erzeugten Punktpaare/Dreiecke auf dem Endeffektor	100
m	Anzahl der erzeugten Punktpaare/Dreiecke auf dem Handhabungsobjekt	$1 \cdot 10^6$
r_{min}	Mindestabstand zwischen zwei Punktclustern im Digitalen Zwilling	10 mm
θ_{grenz}	Grenzwert für den Winkelabgleich im Featureset	2°
—	Dichte der Punkte auf den Wirkflächen zur Bestimmung der Verschiebungsrichtung \vec{s}	0.2 Punkte/mm ²
$\Delta x, \Delta y$	Diskretisierung für die Überprüfung potentieller Punktkontakte	5 mm

A.2. Performance Vergleich verschiedener Clipping Algorithmen

Für das Clipping der erzeugten Polygone können sowohl dedizierte Clipping-Algorithmen [Vatti, 1992] [Sutherland et al., 1974a] als auch orientierte Hüllkörper [Gottschalk et al., 1996] oder die Intersektion von Dreiecken [L. Sabharwal et al., 2015] mittels Ungleichungen verwendet werden. Eine Implementierung des *Vatti* Algorithmus erfordert integer Werte als Input, weshalb für die Anwendung alle Eingangswerte konvertiert werden müssen. Die unterschiedlichen Algorithmen wurden für drei Testobjekte (siehe Abb. A.1) evaluiert und sind in Tabelle A.2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für den

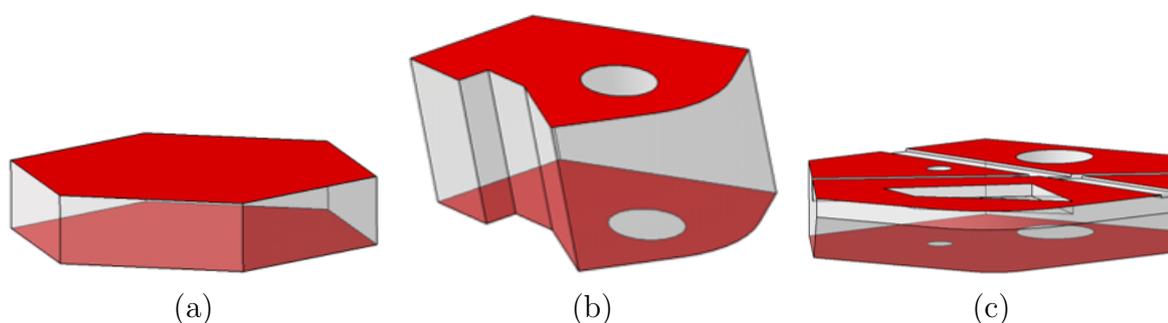


Abbildung A.1.: Testobjekte für die Evaluation der Polygon Clipping Algorithmen mit eingefärbten Lösungsraum (rot) für die Greifpunktbestimmung.

OBBTree Algorithmus eine Zuverlässigkeit von ca. 30 % für alle drei Testobjekte. Die anderen Verfahren erreichen jeweils eine 100 % Genauigkeit. Unter diesen drei Verfahren zeigte der *Vatti*-Algorithmus die beste Performance (Berechnungszeit pro Polygon [s]) für alle drei Testobjekte. Zur Bestimmung der Intersektion zweier Polygone wird deshalb in der Arbeit der *Vatti*-Algorithmus verwendet.

Tabelle A.2.: Darstellung der durchschnittlichen Berechnungszeit [s] und der Zuverlässigkeit [%] des *Weiler Atherton* Algorithmus, *Vatti* Algorithmus, OBBTree Verfahren und Dreiecksabgleich (T-T) zur Bestimmung überlappender Polygone.

Objekt	Weiler-Atherton	Vatti	OBBTree	T-T
Objekt (a)	1.02 (100 %)	0.023 (100 %)	0.0354 (30 %)	0.742 (100 %)
Objekt (b)	11.26 (100 %)	0.063 (100 %)	0.0364 (30 %)	1.2961 (100 %)
Objekt (c)	30.83 (100 %)	0.11 (100 %)	0.0362 (31 %)	2.78 (100 %)

A.3. Geometrische Abmaße der Konvexen Hüllen für die Testobjekte

Tabelle A.3.: Volumen V der konvexen Hülle für die Testobjekte.

Testobjekt	Volumen konvexe Hülle $V [mm^3]$
Kugel	3784.3
Zylinder	15529.14
Mutter	77724.0
Hexaeder	18750.0
Kreisring	7064.3
SileaneBrick	41158.7
SileaneTLess22	207066.0
SileaneTLess20	174334.6
SileaneTLess29	99000.0
IPARingScrew	70939.6
IPAGearShaft	55498.0
SileaneCandle-Stick	2376209.5
SileanePepper	511362.6
SileaneGear	20442.7
SileaneBunny	1205829.9

A.4. Evaluation der Materialmodelle

A.4.1. Voigt Modell

Das *Voigt* Modell beschreibt mit (A.1) die Bestimmung eines Parameters u aus der Summe aller Komponenten u_i und dessen Volumenanteilen $v_{f,i}$. Hiermit wird im allgemeinen die obere Grenze der Materialparameter eines Verbundwerkstoffes definiert

$$u = \sum_{i=1}^N v_{f,i} u_i. \quad (\text{A.1})$$

A.4.2. Reuss Modell

Das *Reuss* Modell beschreibt mit (A.2) die Bestimmung eines Parameters u aus der Summe aller Komponenten u_i und dessen Volumenanteilen $v_{f,i}$. Hiermit wird im

allgemeinen die untere Grenze der Materialparameter eines Verbundwerkstoffes definiert

$$u = \left(\sum_{i=1}^N \frac{v_{f,i}}{u_i} \right)^{-1}. \quad (\text{A.2})$$

A.4.3. Mori-Tanaka Modell

Nach [Mori et al., 1973] setzt sich der Elastizitätstensor des Verbundwerkstoffes C_c aus den einzelnen Subkomponenten C_m und C_p zusammen:

$$C_c = (v_{f,m} \cdot C_m + v_{f,p} \cdot C_p \cdot A_p) \cdot (v_{f,m} \cdot I + v_{f,p} \cdot A_p)^{-1}. \quad (\text{A.3})$$

$v_{f,m,p}$ stellen die Volumenanteile des Bindemittels und des Metallpulvers dar, wobei gilt $v_{f,m} + v_{f,p} = 1$, I entspricht einer Einheitsmatrix vierten Ranges und A_p bezeichnet den *Eshelby* Dehnungskonzentrationstensor [Parnell, 2016]. A_p setzt sich zusammen aus der Einheitsmatrix I , den Elastizitätstensoren $C_{m,p}$ und dem *Eshelby Tensor* S_p [Eshelby, 1957]:

$$A_p = [(I + S_p(C_m)^{-1}(C_p - C_m))]^{-1}. \quad (\text{A.4})$$

Nach [Nemat-Nasser et al., 1987] gilt für kugelförmige Partikel:

$$S_{p,Kugel} = \begin{bmatrix} \frac{1}{15} \cdot \frac{7-5\nu}{1-\nu} & \frac{1}{15} \cdot \frac{5\nu-1}{1-\nu} & \frac{1}{15} \cdot \frac{5\nu-1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{15} \cdot \frac{5\nu-1}{1-\nu} & \frac{1}{15} \cdot \frac{7-5\nu}{1-\nu} & \frac{1}{15} \cdot \frac{5\nu-1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{15} \cdot \frac{5\nu-1}{1-\nu} & \frac{1}{15} \cdot \frac{5\nu-1}{1-\nu} & \frac{1}{15} \cdot \frac{7-5\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{15} \cdot \frac{4-5\nu}{1-\nu} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{15} \cdot \frac{4-5\nu}{1-\nu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{15} \cdot \frac{4-5\nu}{1-\nu} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

$$S_{p,Kugel} = \begin{bmatrix} 0.521 & 0.0423 & 0.0423 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0423 & 0.521 & 0.0423 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0423 & 0.0423 & 0.521 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.479 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.479 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.479 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0.00003919 & -0.000002256 & -0.000002256 & 0 & 0 & 0 \\ -0.000002256 & 0.00003919 & -0.000002256 & 0 & 0 & 0 \\ -0.000002256 & -0.000002256 & 0.00003919 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00004144 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00004144 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00004144 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Mit dem Anisotropiefaktor $c_{an} = 0.78$, den Materialparametern (siehe Tabelle 6.2), den Volumenanteilen ($v_{v,m} = 0.3$, $v_{f,p} = 0.7$) ergibt sich mit dem Mori-Tanaka Modell (A.3) der folgende Elastizitätstensor:

$$C_c = \begin{bmatrix} 28.6124 & 1.7001 & 1.7001 & 0 & 0 & 0 \\ 1.7001 & 28.6124 & 1.7001 & 0 & 0 & 0 \\ 1.7001 & 1.7001 & 28.6124 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8.8079 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8.8079 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8.8079 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.8})$$

A.4.4. Hill Budiansky Modell

Ein selbstkonsistentes Modell ist in [Hill, 1965][Budiansky, 1983] gegeben. In diesem Modell wird jede, in der Matrix eingeschlossene Komponente, als individuelle inhomogene Phase betrachtet. Vergleichbar zum *Mori-Tanaka* Modell kann der Elastizitätstensor C_c aus den Volumenanteilen $v_{f,p}$, $v_{f,m}$, sowie den Elastizitätstensoren C_p , C_m der enthaltenen Komponenten bestimmt werden. Der verwendete *Eshelby* Dehnungskonzentrationstensor A_p ist (A.4) zu entnehmen

$$C_c = C_m + v_{f,p} \cdot C_p \cdot A_p. \quad (\text{A.9})$$

Der resultierende Elastizitätstensor C_c mit dem *Hill Budiansky* Modell ist in (A.10) abgebildet:

$$C_c = \begin{bmatrix} 46.73 & 9.88 & 9.88 & 0 & 0 & 0 \\ 9.88 & 46.73 & 9.88 & 0 & 0 & 0 \\ 9.88 & 9.88 & 46.73 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 18.43 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 18.43 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18.43 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.10})$$

A.4.5. Elastizitätsmatrix C für transversal isotropes Materialverhalten

$$C = \begin{bmatrix} 1.45 & 6.07 & 6.07 & 0 & 0 & 0 \\ 6.07 & 14.31 & 6.47 & 0 & 0 & 0 \\ 6.07 & 6.47 & 14.31 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.03 \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

A.5. Rohdaten der rekonstruierten Testszenarien

Tabelle A.4.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS1 im Digitalen Zwilling.

	TS1
Enthaltene Objekte	1
Erzeugte Cluster	1
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ICP [mm])	
Kugel	2.0/0.0792

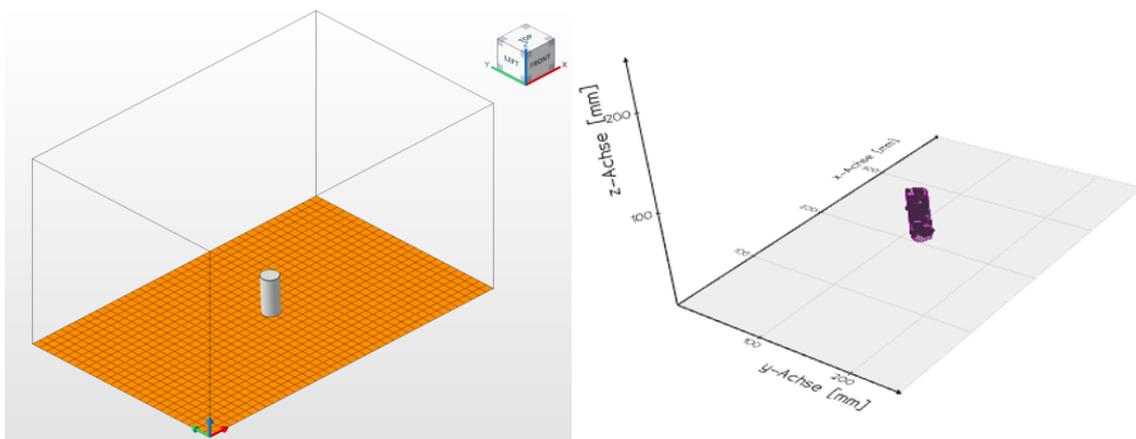


Abbildung A.2.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS2.

Tabelle A.5.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS2 im Digitalen Zwilling.

	TS2
Enthaltene Objekte	1
Erzeugte Cluster	1
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ICP [mm])	
Zylinder	5.6/0.0759

Tabelle A.6.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS3 im Digitalen Zwilling.

	TS3
Enthaltene Objekte	1
Erzeugte Cluster	1
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ICP [mm])	
IPAGearShaft	10.4/7.861

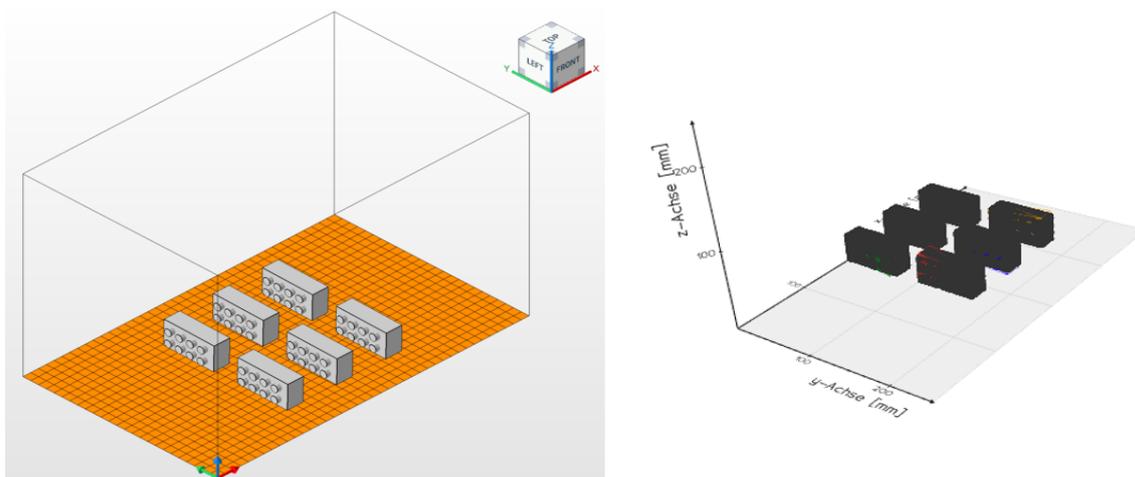


Abbildung A.3.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS5.

A.6. Konvertierung von Pixel in DPI

Üblicherweise erfolgt eine Positionierung in kartesischen Koordinaten, allerdings erfordern die bitmaps hier eine Konvertierung in Pixel px . Als Faktor zur Konvertierung werden Punkte pro Inch (engl. dots per inch) (**dpi**) verwendet. Dieser Wert spezifiziert

Tabelle A.7.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS3 im Digitalen Zwilling mit 10000 Datenpunkten.

	TS3 (10000)
Enthaltene Objekte	1
Erzeugte Cluster	1
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ICP [mm])	
IPARingScrew	2.9/0.0976

Tabelle A.8.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS4 im Digitalen Zwilling.

	TS4
Enthaltene Objekte	6
Erzeugte Cluster	6
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ICP/PF/PF+ICP)	
Kreisring	(6.3 %/0.134/0.298/0.135)
	(7.0 %/0.119/0.277/0.119)
	(7.9 %/0.146/0.612/0.147)
	(5.1 %/0.135/0.461/0.135)
	(6.2 %/0.144/0.372/0.144)
	(7.6 %/0.124/0.824/0.124)

die Anzahl der Punkte pro Pixel und bestimmt somit das $\langle \Delta x, \Delta y \rangle$ eines Pixels:

$$\Delta x, \Delta y = \frac{25.4 \text{ mm}}{\text{dpi}}. \quad (\text{A.12})$$

Mit diesem Wert lassen sich anschließend Längenangaben zwischen kartesischen Koordinaten und px Konvertieren.

Tabelle A.9.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS5 im Digitalen Zwilling.

	TS5
Enthaltene Objekte	6
Erzeugte Cluster	6
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ ICP /PF/PF+ ICP)	
SilaneBrick	(18.4 %/1.502/1.934/1.262)
	(18.0 %/1.550/1.246/1.272)
	(17.7 %/1.497/1.963/1.447)
	(18.6 %/1.514/2.862/1.276)
	(17.9 %/1.496/1.769/1.264)
	(18.8 %/1.494/2.528/1.269)

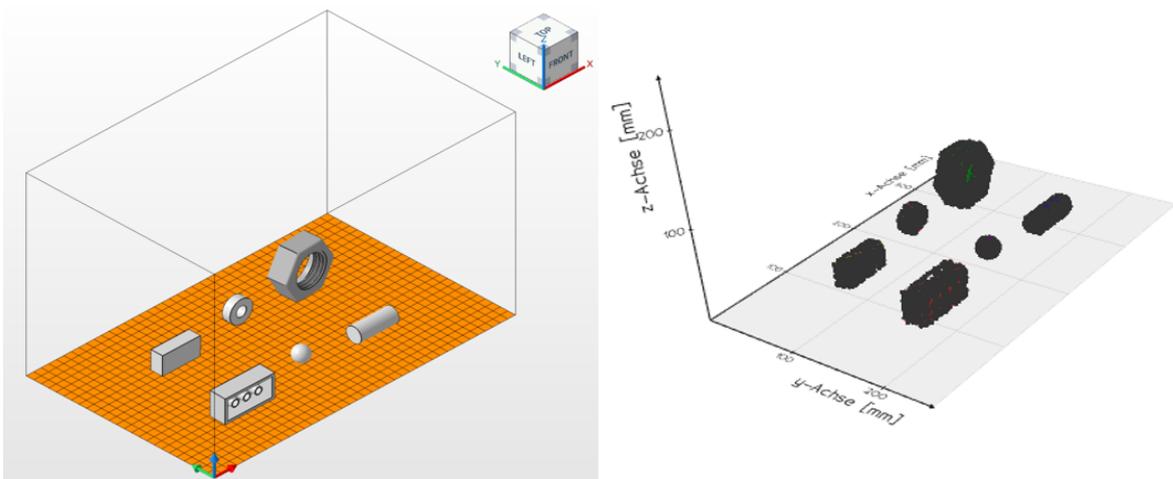


Abbildung A.4.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS6.

Tabelle A.10.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS6 im Digitalen Zwilling.

	TS6
Enthaltene Objekte	6
Erzeugte Cluster	6
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ ICP / PF / $\text{PF}+\text{ICP}$)	
Kugel	(2.1 %/0.076/0.091/0.070)
Zylinder	(1.9 %/0.204/0.306/0.211)
Mutter	(0.6 %/0.440/1.020/0.263)
Hexaeder	(1.2 %/4.806/1.720/0.379)
Kreisring	(2.0 %/0.135/0.153/0.135)
SilaneBrick	(17.4 %/2.702/1.569/1.309)

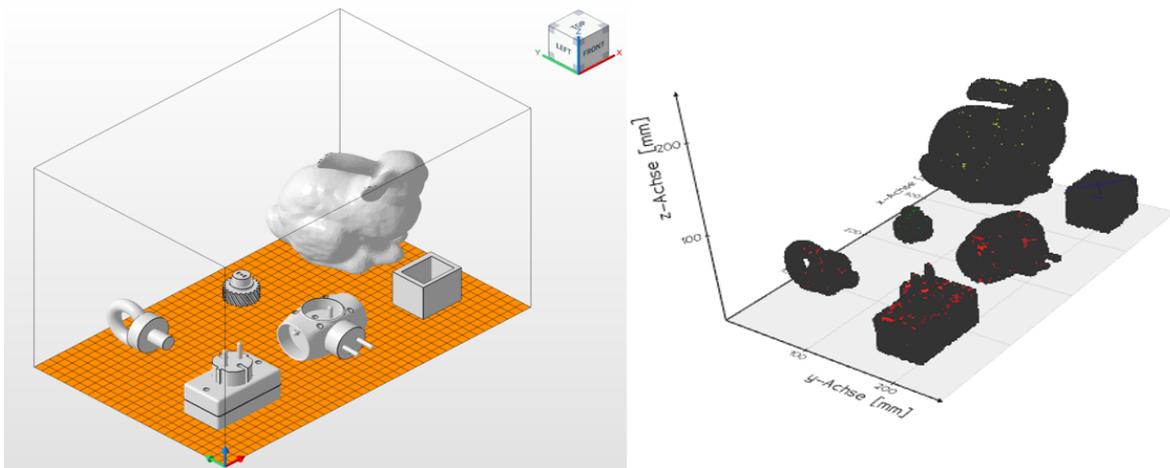


Abbildung A.5.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS7.

Tabelle A.11.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS7 im Digitalen Zwilling.

	TS7
midrule Enthaltene Objekte	6
Erzeugte Cluster	6
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ ICP / PF / $PF+ICP$)	
Kreisring	(2.7 %/0.093/1.541/0.092)
SileaneTLess22	(0.9 %/0.117/6.524/0.117)
SileaneTLess20	(1.2 %/4.319/1.136/0.102)
SileaneTLess29	(0.4 %/5.885/2.903/0.352)
SileaneGear	(6.8 %/1.492/0.752/0.144)
SileaneBunny	(0.6 %/7.068/6.790/0.132)

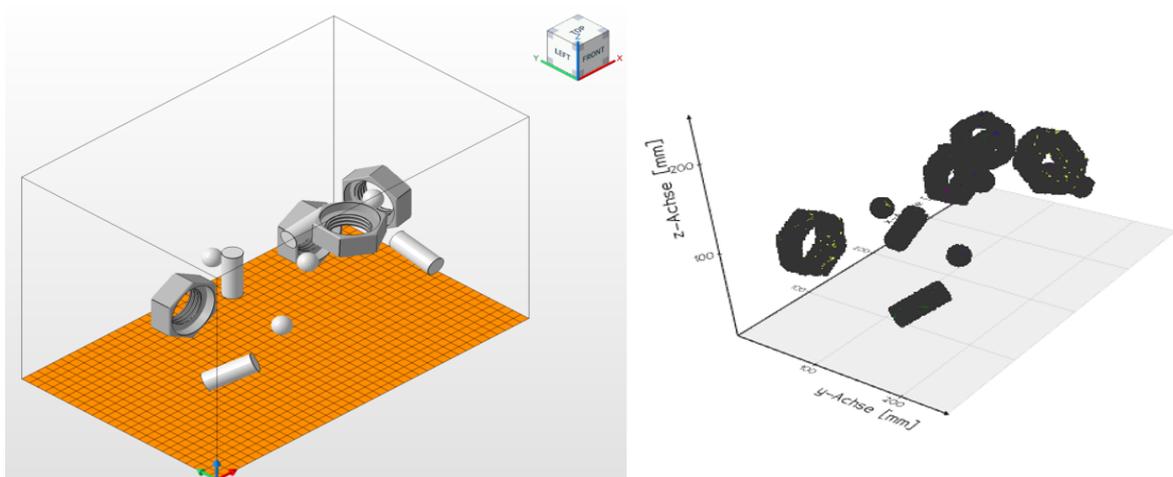


Abbildung A.6.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS8.

Tabelle A.12.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS8 im Digitalen Zwilling.

	TS8
Enthaltene Objekte	12
Erzeugte Cluster	12
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ ICP / PF / $\text{PF}+\text{ICP}$)	
Kugel	(2.5 %/0.076/0.166/0.068) (0.4 %/0.077/0.114/0.065) (1.0 %/0.077/0.231/0.073) (2.3 %/0.068/0.096/0.061)
Zylinder	(0.4 %/0.153/0.634/0.148) (1.4 %/0.121/0.517/0.128) (0.9 %/0.127/1.221/0.126) (1.2 %/0.129/0.591/0.126)
Mutter	(1.3 %/0.170/1.939/0.184) (1.4 %/0.210/0.823/0.238) (1.4 %/0.587/2.639/0.226) (0.9 %/0.167/0.847/0.172)

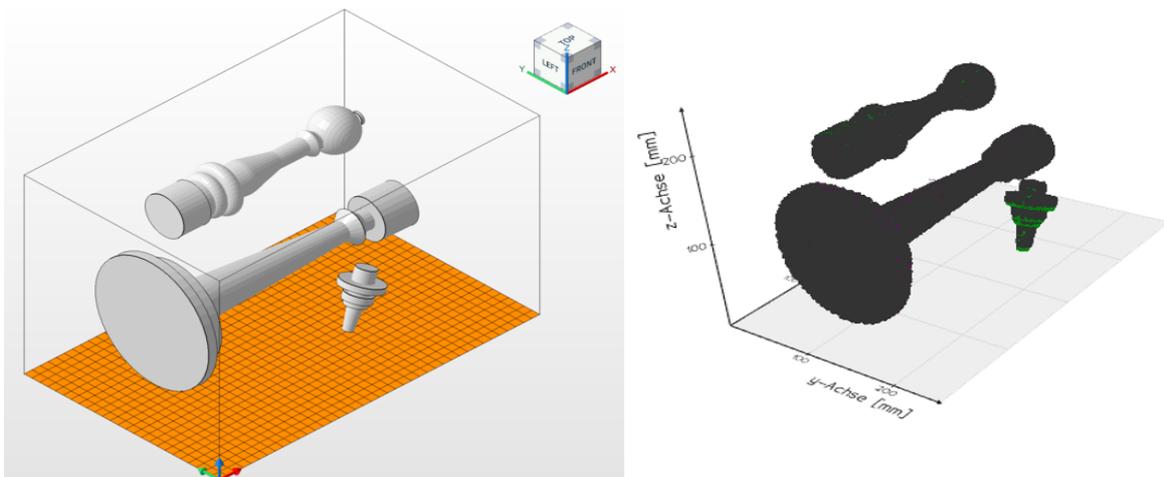


Abbildung A.7.: Vergleich zwischen den Realdaten und den rekonstruierten Daten im Digitalen Zwilling für TS9.

Tabelle A.13.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS9 im Digitalen Zwilling.

	TS9
Enthaltene Objekte	3
Erzeugte Cluster	3
Genauigkeit	100 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ \overline{ICP} /PF/PF+ \overline{ICP})	
IPAGearShaft	(6.2 %/1.730/2.606/1.734)
SileaneCandleStick	(0.2 %/0.128/1.795/0.123)
SileanePepper	(1.1 %/0.711/2.475/0.705)

Tabelle A.14.: Auswertung des rekonstruierten Testszenario TS10 im Digitalen Zwilling.

	TS10
Enthaltene Objekte	15
Erzeugte Cluster	15
Genauigkeit	86.7 %
Berechnungszeit	1
Fehler (V [%]/ \overline{ICP} /PF/PF+ \overline{ICP})	
Kugel	(1.0 %/0.0716/0.162/0.057)
Zylinder	(1.2 %/0.109/0.958/0.109)
Mutter	(1.6 %/0.223/0.706/0.254)
Hexaeder	(1.7 %/4.728/2.044/0.460)
	(3.1 %/10.955/10.978/10.424)
Kreisring	(0.1 %/0.136/0.467/0.136)
SileaneBrick	(%/--/--)
SileaneTLess22	(0.1 %/0.142/1.957/0.142)
SileaneTLess20	(0.4 %/0.161/0.949/0.161)
SileaneTLess29	(2.5 %/5.548/0.819/0.348)
IPARingScrew	(2.6 %/0.086/2.520/0.086)
IPAGearShaft	(4.6 %/1.674/5.844/5.349)
	(12.0 %/3.460/6.048/3.877)
SileaneCandleStick	(0.3 %/0.127/1.242/0.130)
SileanePepper	(1.1 %/0.689/1.079/0.709)
SileaneGear	(%/--/--)
SileaneBunny	(0.5 %/6.805/4.124/0.136)

Publikationen

Im Rahmen dieser Dissertation wurden die Forschungsergebnisse in den Folgenden Publikationen veröffentlicht. Die publizierten Inhalte sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen.

Ludwig Vogt, Robert Ludwig and Johannes Schilp. 2023. Automatic end tool alignment through plane detection with a RANSAC-algorithm for robotic grasping. *Procedia CIRP* 118, 253-258. DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.044

Ludwig Vogt and Johannes Schilp. 2022. Finite element based compression and volumetric load analysis for grasped objects. In *2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 16-18 November 2022, Maldives, Maldives. IEEE, Piscataway, NJ, 1-6 DOI: 10.1109/iceccme55909.2022.9987947

Ludwig Vogt, Tobias Ciemala, Jonas Freitag and Johannes Schilp. 2021. Computing convex grasping positions for parallel jaw grippers with an integrated boundary layer mesher. In Davide Brugali, Jean-Claude Latombe, Phillip Sheu and Rouh-Mei Hu (Ed.). *Fifth International Conference on Robotic Computing (IRC 2021)*, Taichung, Taiwan, 15-17 November 2021. IEEE Computer Society, Washington, DC, 77-81 DOI: 10.1109/irc52146.2021.00018

Ludwig Vogt, Yannick Zimmermann and Johannes Schilp. 2021. Computing gripping points in 2D parallel surfaces via polygon clipping. In T. Schüppstuhl (Ed.). *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*. Springer, Berlin, 101-112. DOI: 10.1007/978-3-030-74032-0_9

Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Lehrstuhl für Produktionsinformatik der Universität Augsburg in den Jahren von 2018 bis 2024 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentische Arbeiten. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen.

Abschlussarbeiten

Studierende:er	Titel
Graf, Julian (B.Sc.)	Diskrete Elemente Simulation für das automatisierte Entpacken im Binder Jetting
Kampf, Robert (M.Sc.)	Optimierungsbasierte Greifpunktbestimmung im Bin Picking
Ludwig, Robert (M.Sc.)	Bestimmung von Greifpositionen anhand von 3D-Punktwolken
Packan, Filip (B.Sc.)	Automatisierte Objekterkennung von 3D-Objekten mittels Künstlicher Intelligenz
Zimmermann, Yannick (B.Sc.)	Identifikation von Greifpunkten mittels eines Geometrie Mapping in parallelen Flächen

Projektmodule

Studierende:er	Titel
Ciemala, Tobias (M.Sc.)	Entwicklung eines Randflächenvernetzers für STL-Dateien
Dreier, Tim (M.Sc.)	Greifpunktbestimmung durch ML
Erlbacher, Simon (M.Sc.)	Detektion von Objektposes aus bitmap Dateien mittels partiellen Formabgleich
Fischer, Sebastian (M.Sc.)	Bestimmung der Objektpose mittels Künstlicher Intelligenz
Ludwig, Robert (M.Sc.)	Greifpunktbestimmung mittels 3D-Kameradaten in V-Rep
Nowoczyn, Nik Julin (M.Sc.)	Kontextbasierte Greifpunktbestimmung im Postprocessing des Binder Jetting

Seminare

Studierende:er	Titel
Lang, Wolfgang (M.Sc.)	Technologieüberblick Greifpunktbestimmung und -bewertung
Ludwig, Robert (M.Sc.)	Darstellung von CAD-Daten in verschiedenen Dateiformaten
Nowoczyn, Nik Julin (M.Sc.)	Bahnplanung am UR5e ohne Singularitäten

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Ludwig Vogt, an Eides statt, dass ich die Dissertation mit dem Titel „Integrierter Ansatz zur individuellen Teilehandhabung im Binder Jetting: Mechanische Analyse, virtuelle Rekonstruktion und Optimierung der Handhabungsreihenfolge“ selbstständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die den herangezogenen Werken wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Ich versichere, dass ich keine kommerzielle Promotionsberatung in Anspruch genommen habe und die Arbeit nicht schon in einem früheren Promotionsverfahren im In- oder Ausland angenommen oder als ungenügend beurteilt worden ist.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift Doktorand:in

